# บทที่ 4

# การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

## 4.1 การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ

ในการทดสอบวัสดุต่าง ๆ ทางด้านวิศวกรรมเพื่อที่จะนำผลของข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์โดยปกติข้อมูลที่ได้จากการทดสอบย่อมเกิดความแปรผันไม่ว่าจำนวนตัวอย่างที่ทำการทดสอบมีปริมาณมากเท่าใดก็ตาม ดังนั้นจำเป็นต้องใช้วิธีทางสถิติทำการวิเคราะห์ผลของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ การวิเคราะห์วิธีทางสถิติจะเริ่มด้วยการแจกแจงข้อมูลในลักษณะการกระจายของข้อมูลจากนั้นจึงคำนวณหาค่ากลาง และ ค่าเบี่ยงเบนค่ากลางของข้อมูล เป็นต้น

### 4.1.1 การวัดแนวโน้มค่ากลางของข้อมูล

ข้อมูลที่ทำการวิเคราะห์โดยส่วนมากมักมีการเรียงลำดับค่าตัวเลขจากต่ำสุดไปจนกระทั่งสูงสุดและทำการแจกแจงความถี่ของข้อมูลให้เป็นกลุ่มรวมทั้งแจกแจงความถี่สะสมของข้อมูลเพื่อที่จะได้ทราบว่าข้อมูลนี้มีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดให้กี่เปอร์เซ็นต์ โดยการนำเสนอข้อมูลมีทั้งแสดงด้วยตารางและแสดงด้วยกราฟของการกระจายข้อมูล อย่างไรก็ตามค่าตัวเลขที่ใช้อธิบายลักษณะการกระจายของข้อมูลก็เป็นสิ่งจำเป็น เช่น ค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง (Sample mean) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดค่ากลางของข้อมูล สามารถแสดงได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{n} \qquad (4.1)$$

โดยที่ $\bar{x}$ แทนค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง
$x_i$ แทนค่าที่ i ของปริมาณที่ทำการวัด
n แทนค่าจำนวนของตัวอย่างที่ทำการวัด

เนื่องจากเวลาและค่าใช้จ่ายมีผลต่อจำนวนของข้อมูลที่ทำการทดสอบ จึงส่งผลให้จำนวนข้อมูลโดยทั่วไปต้องถูกจำกัดตัวอย่างการทดสอบ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง $\bar{x}$ จึงต้องประมาณเป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic mean, $\mu$) ของประชากรทั้งหมด ส่วนการวัดแนวโน้มค่ากลางของข้อมูลยังสามารถแสดงด้วยค่า มัธยฐาน และ ฐานนิยม ได้ด้วย มัธยฐาน คือค่ากลางของข้อมูลทั้งหมดเมื่อได้เรียงข้อมูลจากค่าน้อยสุดไปหาค่ามากสุดหรือเรียงจากค่ามากสุดไปหาค่าน้อยสุด ส่วนฐานนิยม คือ ค่าของข้อมูลที่มีความถี่สูงสุด โดยปกติ

การวัดแนวโน้มค่ากลางทั้งสามค่ามีค่าใกล้เคียงกันหรืออยู่จุดเดียวกันถ้าข้อมูลมีการแจกแจงความถี่เป็นเส้นโค้งปกติ

### 4.1.2 การวัดค่าเบี่ยงเบนของข้อมูล

จากการหาค่ากลางของข้อมูล เป็นการหาจุดสมดุลของข้อมูลแต่เราไม่รู้ว่าข้อมูลนั้นมีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใดเพราะข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแต่ละชุดมีค่าไม่เท่ากันเป็นผลทำให้ตำแหน่งของข้อมูลย่อมอยู่กระจัดกระจายกันมากบ้างน้อยบ้าง ในการวัดค่าเบี่ยงเบนของข้อมูลอาจวัดได้ 4 รูปแบบ คือ พิสัย (Range) ส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย (Mean deviation) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) และ ความแปรปรวน (Variance)

พิสัย (Range: R) คือ ค่าที่ใช้วัดการกระจายที่ได้จากผลต่างระหว่างข้อมูลที่มีค่าสูงสุดและข้อมูลที่มีค่าต่ำสุด สามารถเขียนเป็นสมการได้

$$R = x_L - x_S \tag{4.2}$$

โดยที่ $x_L$ และ $x_S$ คือ ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของข้อมูล

ส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย (Mean deviation: M.D.) คือ ค่าที่ใช้วัดการกระจายของข้อมูลที่ได้จากการเฉลี่ยค่าสัมบูรณ์ของความแตกต่างระหว่างค่าของข้อมูลแต่ละค่าจากค่ากลางของข้อมูลชุดนั้น สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$M.D. = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| x_i - \bar{x} \right|}{n} \tag{4.3}$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: $S_x$) คือ ค่าที่ใช้วัดการกระจายของข้อมูลที่นิยมใช้กันแพร่หลาย สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$S_x = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{4.4}$$

ความแปรปรวน (Variance: $S_x^2$) คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานยกกำลังสอง สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \tag{4.5}$$

เนื่องจากจำนวนของตัวอย่าง (Sample size: n) มีการจำกัดปริมาณการทดสอบทำให้ปริมาณจำนวนตัวอย่างที่ทดสอบมีค่าน้อย ดังนั้นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $S_x$ และความแปรปรวน $S_x^2$ ของตัวอย่างจึงเป็นการประมาณค่าจริงของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\sigma_x$ และความแปรปรวน $\sigma_x^2$ ของประชากร ส่วนตัวหาร (n-1) ของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและความแปรปรวนของตัวอย่างจะช่วยลดความผิดพลาดจากการแทนค่าเฉลี่ยของประชากร $\mu$ ด้วยค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง $\bar{x}$

สัมประสิทธิ์ความแปรผัน (Coefficient of variance: $C_v$) มักจะนิยมใช้เพื่อเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูลสัมพัทธ์กับค่าเฉลี่ยของตัวอย่างในเทอมของร้อยละ สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$C_v = \frac{S_x}{\bar{x}}(100) \tag{4.6}$$

**4.1.3 ฟังก์ชันการกระจายปกติ**

ฟังก์ชันการกระจายปกติจะมีรูปร่างของเส้นโค้งการกระจายในลักษณะ Normalized relative frequency diagram ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 โดยฟังก์ชันการกระจายจะขึ้นอยู่กับตัวแปร สองค่า ได้แก่ ค่าเฉลี่ย $\mu$ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\sigma$ โดยสมการสำหรับความถี่สัมพัทธ์ที่ขึ้นกับตัวแปรสองค่าสามารถเขียนในรูปของ

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-(z/2)^2} \tag{4.7}$$

โดยที่

$$z = \frac{x-\mu}{\sigma} \tag{4.8}$$

ข้อมูลจากการทดสอบที่มีการกำหนดตัวอย่างสามารถแทนค่าเฉลี่ยของประชากรด้วยค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง และ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากรด้วยส่วนเบี่ยงเบนของตัวอย่าง ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้ผู้ทำการทดสอบใช้ข้อมูลที่มีจำนวนจำกัดเป็นตัวแทนของประชากรได้ทั้งหมด ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเราสามารถคาดการณ์เกี่ยวกับคุณสมบัติของประชากรได้ด้วยการพิจารณาฟังก์ชันการกระจายเส้นโค้งปกติดังที่แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยพื้นที่ทั้งหมดสามารถคำนวณได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$A = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-(z^2/2)} dz \qquad = 1 \tag{4.9}$$

จากสมการ (4.9) ให้ความหมายว่าโอกาสความเป็นไปได้ที่จะเกิดเหตุการณ์ z ซึ่งอยู่ระหว่าง - $\alpha$ ถึง $\alpha$ ของประชากร มีค่าเท่ากับ 1 หรือ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นหากต้องการทราบโอกาสความเป็นไปได้ที่เกิดเหตุการณ์ในช่วงหนึ่งของการวัดผลจากการทดสอบ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 โอกาสความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้นในช่วงระหว่าง $z_1$ และ $z_2$ สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$P(z_1,z_2) = \int_{z_1}^{z_2} f(z)dz = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{z_1}^{z_2} e^{-(z^2/2)}dz \qquad (4.10)$$

ในการคำนวณสมการ (4.10) มักจะยุ่งยากจึงสร้างตารางเพื่อสะดวกในการหาพื้นที่ใต้เส้นโค้งการกระจายปกติ ดังแสดงได้ในตารางที่ 4.1 ที่แสดงพื้นที่ใต้เส้นโค้งเพียงด้านเดียว โดยกำหนดค่า $z_1$ มีค่าเท่ากับศูนย์ และค่า $z_2$ คือค่าด้านหนึ่งของฟังก์ชันการกระจาย เนื่องจากฟังก์ชันการกระจายเส้นโค้งปกติมีความสมมาตรรอบแกน z เท่ากับศูนย์ ดังนั้นตารางที่แสดงตัวเลขของพื้นที่ใต้เส้นโค้งก็เพียงพอสำหรับการคำนวณพื้นที่โดยรอบทั้งหมด จะเห็นได้ว่าเราสามารถคาดการณ์ผลการทดสอบที่จะเกิดขึ้นจากโอกาสความเป็นไปได้ของการทดสอบที่อยู่ในช่วงระหว่าง $\bar{x} \pm S_x$ ซึ่งจะให้ค่าเท่ากับ 63.8 เปอร์เซ็นต์ หรือ ถ้าข้อมูลตกอยู่ในช่วงระหว่าง $2\bar{x} \pm S_x$ โอกาสความเป็นไปได้จะมีค่าเท่ากับ 95.4 เปอร์เซ็นต์ หรือ ถ้าข้อมูลตกอยู่ในช่วงระหว่าง $3\bar{x} \pm S_x$ โอกาสความเป็นไปได้จะมีค่าเท่ากับ 99.7 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น

### 4.1.4 ช่วงความเชื่อมั่นสำหรับการคาดการณ์

ข้อมูลที่เกิดจากการทดสอบในแต่ละครั้งมักจะแสดงออกมาในรูปการกระจายของกราฟเส้นโค้งปกติโดยประกอบด้วยค่าเฉลี่ย $\bar{x}$ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $S_x$ โดยมีการคาดการณ์การตรวจสอบผลของข้อมูลที่จะเกิดขึ้นซึ่งมักจะเกี่ยวข้องกับระดับความเชื่อมั่น สิ่งที่ไม่สามารถคาดการณ์ความเชื่อมั่นได้คือ ผลของความผิดพลาดของตัวอย่าง (Sampling error) ความผิดพลาดของตัวอย่างก็คือการนำตัวอย่างข้อมูลที่เป็นกลุ่มที่มีการตรวจสอบ n ครั้ง ซึ่งข้อมูลนี้เป็นข้อมูลจากประชากรเดียวกันแล้วมาจัดเรียงข้อมูลและหาค่าเฉลี่ย $\bar{x}_1$ , $\bar{x}_2$ , $\bar{x}_3$ , ... ซึ่งค่า $\bar{x}$ ที่เกิดขึ้นแต่ละค่าเป็นค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกัน แต่ความแตกต่างของค่าที่เกิดขึ้นสามารถกำหนดเป็นลักษณะฟังก์ชันการกระจายเส้นโค้งปกติดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 โดยค่าเฉลี่ยการกระจายของ x และ $\bar{x}$ มีค่าเดียวกัน แต่ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $\bar{x}$ บางครั้งอาจเรียกว่าความผิดพลาดมาตรฐาน (Standard error) จะมีค่าน้อยกว่า $S_x$ ดังสมการข้างล่างนี้

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} \qquad (4.11)$$

ถ้าทราบส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\bar{x}$ อาจจะเป็นไปได้สำหรับการกำหนดความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ยจริง $\mu$ ของประชากรที่จะเกิดขึ้นจากจำนวนตัวอย่างข้อมูล n ตัวอย่าง ถ้าทราบว่ามีจำนวนข้อมูล $n > 25$ ช่วงความเชื่อมั่นที่ค่าเฉลี่ยของประชากร $\mu$ จะเกิดขึ้นในช่วงนี้สามารถกำหนดโดยสมการข้างล่างนี้

$$(\bar{x} - zS_{\bar{x}}) < \mu < (\bar{x} + zS_{\bar{x}}) \qquad (4.12)$$

โดยที่ $(\bar{x} - zS_{\bar{x}})$ คือ ขีดจำกัดต่ำสุดของความเชื่อมั่น
$(\bar{x} + zS_{\bar{x}})$ คือ ขีดจำกัดสูงสุดของความเชื่อมั่น

ความกว้างช่วงความเชื่อมั่นกับระดับความเชื่อมั่น (Confidence level) ที่ต้องการจะมีความสัมพันธ์กัน ตัวอย่างเช่น ถ้า $z=3$ ในสมการ (4.12) จะมีผลทำให้โอกาสความเป็นไปได้ที่ค่าเฉลี่ยของประชากรจะอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นนี้สูงถึง 99.7 เปอร์เซ็นต์ แต่ขณะที่ความกว้างช่วงความเชื่อมั่นมีค่าลดลงโอกาสความเป็นไปได้ของค่าเฉลี่ยของประชากรที่จะตกอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นก็จะมีค่าลดลงตามไปด้วย โดยทั่วไประดับความเชื่อมั่นและช่วงความเชื่อมั่นสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

เมื่อจำนวนตัวอย่างที่จะนำมาทำการทดสอบมีจำนวนน้อยกว่า ($n < 20$) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $S_x$ ไม่สามารถจะใช้ค่าประมาณของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\sigma$ ของประชากรมีผลทำให้สมการ (4.12) ไม่สามารถนำมาใช้หาความเชื่อมั่นที่ค่าเฉลี่ย $\mu$ ของประชากรที่จะเกิดขึ้นในช่วงความเชื่อมั่นที่กำหนด แต่เราสามารถดัดแปลงสมการ (4.12) ใหม่ได้เมื่อจำนวนข้อมูลมีค่าน้อยได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$(\bar{x} - t(\alpha)S_{\bar{x}}) < \mu < (\bar{x} + t(\alpha)S_{\bar{x}}) \qquad (4.13)$$

โดยที่ $t(\alpha)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายของ Student's t
$\alpha$ คือ ระดับความเชื่อมั่น

ฟังก์ชันการกระจาย Student's t มักจะกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับความถี่สัมพัทธ์ f(t) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$f(t) = F_o\left(1 + \frac{t^2}{\upsilon}\right)^{(\upsilon+1)/2} \qquad (4.14)$$

โดยที่ $F_o$ คือ ความถี่สัมพัทธ์ที่ t=0 ที่จะให้ค่าพื้นที่ภายใต้เส้นโค้ง F(t) มีค่าเท่ากับหนึ่ง

$\upsilon$ คือ จำนวนดีกรีอิสระมีค่าเท่ากับ n-1

ฟังก์ชันการกระจาย Student's t ที่แสดงในรูปที่ 4.4 จะแสดงถึงการกระจายดีกรีอิสระที่แตกต่างกัน จากรูปจะเห็นได้ว่าถ้าดีกรีอิสระมีค่าเพิ่มมากขึ้นแล้วฟังก์ชันการกระจาย Student's t จะเข้าใกล้ฟังก์ชันการกระจายปกติ ซึ่งพื้นที่การกระจายด้านหนึ่งของฟังก์ชันการกระจาย Student's t จะกำหนดในตารางที่ 4.3

## 4.2 การวิเคราะห์ภายใต้น้ำหนักบรรทุกสถิตย์

การทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกสถิตย์ของดอนแขวนเคเบิลทั้งสามประเภท ได้แก่ ดอนไม้แขวนเคเบิล ดอนเหล็กรูปตัวซี และ ดอนกรีตอัดแรงสปัน เมื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกสถิตย์ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของกราฟการทดสอบระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าความแอ่นตัวของดอนแขวนเคเบิลทั้งสามประเภท กราฟความสัมพันธ์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงเมื่อน้ำหนักบรรทุกที่กระทำยังไม่เกินน้ำหนักบรรทุกที่จุดดรากหรือขีดจำกัดสัดส่วน แต่ถ้าน้ำหนักบรรทุกที่กระทำมีค่ามากกว่าจุดที่กล่าวนี้แล้วความสัมพันธ์ของกราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าความแอ่นตัวจะมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรงโดยที่อัตราการเพิ่มของน้ำหนักบรรทุกมีค่าลดลงขณะที่ค่าความแอ่นตัวกลับมีค่าเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกที่กระทำมีค่าเท่ากับน้ำหนักบรรทุกประลัยแล้วดอนแขวนเคเบิลที่ทำการทดสอบจะเกิดความวิบัติอย่างทันที เมื่อนำผลการทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกสถิตย์ของดอนแขวนเคเบิลทั้งสามประเภทที่ทดสอบจำนวนอย่างละ 30 ตัวอย่าง มาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกที่จุดขีดจำกัดสัดส่วนหรือน้ำหนักบรรทุกดรากและน้ำหนักบรรทุกประลัย ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการทดสอบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.4 จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการทดสอบแสดงให้เห็นว่าน้ำหนักบรรทุกสถิตย์ที่จุดขีดจำกัดสัดส่วนหรือจุดดรากและน้ำหนักบรรทุกประลัยของดอนแขวนเคเบิลทั้งสามประเภทนี้ ดอนไม้แขวนเคเบิลจะให้ค่าน้ำหนักบรรทุกสถิตย์สูงสุด รองลงมาดอนเหล็กรูปตัวซี และ ดอนกรีตอัดแรงสปัน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามดอนเหล็กรูปตัวซีจะให้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบมีค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับดอนไม้แขวนเคเบิลและดอนกรีตอัดแรงสปันหรือให้ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ ดอนเหล็กรูปตัวซีก็จะให้ค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับดอนไม้แขวนเคเบิล และ ดอนกรีตอัดแรงสปัน

เนื่องจากการทดสอบคอนแขวนเคเบิลทั้งสามประเภทนี้เป็นการสุ่มตัวอย่างจำนวน 30 ตัวอย่าง ที่ทำการทดสอบ การสุ่มตัวอย่างนี้เป็นการสุ่มตัวอย่างแบบกลุ่มแล้วเลือกมาเพียงบางส่วนของจำนวนตัวอย่างการทดสอบทั้งหมด ถ้าต้องการทราบค่าเฉลี่ยที่แท้จริงของคอนแขวนเคเบิลที่ทำการทดสอบอาจเป็นไปได้ยากจึงจำเป็นต้องสร้างช่วงความเชื่อมั่นว่าค่าเฉลี่ยที่แท้จริงของคอนแขวนเคเบิลที่ได้ทำการทดสอบมีค่าประมาณเท่าใด สิ่งนี้จำเป็นต้องกำหนดช่วงความเชื่อมั่นเพื่อหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดและขีดจำกัดสูงสุดของความเชื่อมั่น ในกรณีนี้ถ้าช่วงความเชื่อมั่นมีค่า 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ยที่แท้จริงของคอนแขวนเคเบิลทั้งสามประเภทสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.5

ค่าเฉลี่ยจากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสถิตย์ของคอนแขวนเคเบิลทั้งสามประเภท เราสามารถทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบตามข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบได้ อาทิเช่น คอนไม้แขวนเคเบิลสามารถวิเคราะห์ผลการออกแบบตามข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับอาคารไม้ของสมาคมวิศวกรรมแห่งประเทศไทย คอนเหล็กรูปตัวซีสามารถวิเคราะห์ผลตามข้อกำหนดมาตรฐาน สำหรับ AISC-LRFD และ คอนกรีตอัดแรงสปันสามารถวิเคราะห์ผลการออกแบบตามข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของสมาคมวิศวกรรมแห่งประเทศไทย เป็นต้น การวิเคราะห์ผลการทดสอบคอนแขวนเคเบิลในแต่ละประเภทจะแสดงไว้ใน ภาคผนวก ค ส่วนตารางที่ 4.6 จะแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกที่จุดดรากหรือขีดจำกัดสัดส่วนและค่าความแอ่นตัวระหว่างผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ภายใต้ข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบของคอนแขวนเคเบิลในแต่ละประเภท

## 4.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบการกัดกร่อนในสภาวะเร่งทดสอบ

### 4.3.1 คอนไม้แขวนเคเบิลกับความเสื่อมสภาพทางชีววิทยา

การทดสอบการกัดกร่อนในสภาวะเร่งทดสอบโดยนำคอนไม้แขวนเคเบิลทำปฏิกิริยากับน้ำเกลือตลอดระยะเวลาที่ทำการทดสอบไม่ปรากฏการผุสลายทางชีววิทยาเกิดขึ้นกับคอนไม้แขวนเคเบิลซึ่งการทดสอบการกัดกร่อนในสภาวะเร่งทดสอบนี้โดยมากเป็นการทดสอบความเสื่อมสภาพในขบวนการปฏิกิริยาทางเคมี อย่างไรก็ตามความเสื่อมสภาพทางชีววิทยาที่เกิดขึ้นกับคอนไม้แขวนเคเบิลสามารถจำแนกสาเหตุหลัก อันได้แก่ ราในไม้ และ แมลงเจาะไม้ ดังนั้นเราจำเป็นต้องหาวิธีที่จะรักษาเนื้อไม้โดยเข้าใจระบบทางชีววิทยาของตัวทำลายไม้เพื่อที่จะลดการสูญเสียความเสื่อมสภาพของไม้จากตัวทำลายไม้

### 4.3.1.1 ราในไม้ที่เป็นสาเหตุในการเกิดความเสื่อมสภาพของไม้

ความเสื่อมสภาพของไม้ที่เกิดจากราไม้มีอยู่หลายรูปแบบสามารถแบ่งตามความเปลี่ยนแปลงของเนื้อไม้ที่เกิดขึ้น (11) การผุของไม้สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ Brown rot White rot และ Soft rot โดย Brown rot และ White rot จัดอยู่ในตระกูลของราชั้นสูงประเภท Basidiomycetes ส่วน Soft rot จัดเป็นประเภทราที่ไม่สมบูรณ์ โดยการผุของไม้ที่เกิดจากราทั้งสามชนิดนี้จะทำลายส่วนประกอบของเซลลูโลสของเสี้ยนไม้และยังมีราประเภทอื่นที่อาศัยอยู่ในกระพี้ไม้และแก่นไม้เกิดราสีต่าง ๆ เพื่อสร้างความเสื่อมสภาพให้กับไม้

#### 4.3.1.1.1 ลักษณะของราที่ทำลายไม้

ก. Brown rot และ White rot มีความแตกต่างกันในการทำให้ไม้เกิดความเสื่อมสภาพซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องทำความเข้าใจเมื่อไม้ถูกทำลายโดยราของไม้ White rot จะปรากฏราสีขาวขึ้นที่ผิวไม้ขณะที่ราของ Brown rot จะปรากฏราสีน้ำตาลแดงขึ้นที่ผิวไม้ในลักษณะเดียวกัน

ราสีขาวที่เกิดขึ้นกับไม้พบว่ามีการหดตัวของไม้ในสภาพปกติแต่ขณะที่ราสีน้ำตาลจะมีการหดตัวของไม้ในสภาพไม่ปกติเมื่อไม้แห้ง ความแตกต่างจะสังเกตได้จากรูปที่ 4.5 และ รูปแบบทางด้านยาวของไม้เมื่อเกิดราสีน้ำตาลจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งจะปรากฏเป็นลายสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ หลายชิ้นต่อกันเนื่องจากไม้มีการหดตัวตามแนวยาวมาก โดยราสีน้ำตาลที่กระทำกับไม้จะทำให้ไม้เกิดการสูญเสียน้ำอย่างมากดังนั้นไม้ที่เกิดราสีน้ำตาลจึงเปราะและกรอบได้ง่ายกว่าไม้ที่เกิดจากราสีขาวซึ่งไม้ยังคงให้กำลังมากแม้ยังอยู่ในสภาวะเกิดราสีขาวก็ตาม ราสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นกับไม้ยังมีผลทำให้กลสมบัติของไม้มีค่าลดลงแต่ทั้งนี้ความเหนียวของไม้ที่เกิดจากราสีขาวและราสีน้ำตาลจะมีค่าลดลงลักษณะเดียวกัน โดยที่ราสีขาวจะเกิดขึ้นบนแก่นไม้ขณะที่ราสีน้ำตาลจะเกิดขึ้นบนกระพี้ไม้

ข. Soft rot เป็นรูปแบบชนิดที่สามของราที่สร้างความเสื่อมสภาพเกิดขึ้นกับไม้ Soft rot เป็นราที่เกิดขึ้นในลักษณะที่มีรูปร่างไม่แน่นอนในการทำลายเนื้อไม้โดยใช้เวลานานถึงหลายทศวรรษจึงจะเริ่มเกิดขึ้นโดยจะเกิดขึ้นในส่วนถัดจากเนื้อเยื่อเจริญขึ้นไปซึ่งแรกเริ่มจะทำลายเปลือกไม้ที่อยู่ที่บนผิวไม้เมื่อเปลือกไม้ได้รับสภาพเปียกชื้นตลอดหรือมีการจุ่มในน้ำแม้กระทั่งสัมผัสกับดินที่เปียกชื้นตลอดเวลาก็ตาม Soft rot ก็จะเริ่มเคลื่อนที่เข้าไปในเนื้อไม้เมื่อไม้ยังคงสภาพเปียกชื้นอยู่ ถ้าเมื่อไม้มีสภาพแห้งก็จะเกิดรอยสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ที่ผิวไม้ต่อเนื่องกันเกิดขึ้นคล้ายกับราชนิด Brown rot

ยังมีราอีกหลายรูปแบบที่เกิดขึ้นกับไม้และสร้างความเสื่อมสภาพเกิดขึ้นกับไม้ในลักษณะเดียวกัน ได้แก่ Sap-stain fungi เป็นราที่มีหลายสีเกิดขึ้นที่กระพี้ไม้อย่างเดียว เช่น สีน้ำเงิน เขียว ชมพู เหลือง ส้ม และ ดำ ส่วน Discoloration จะเกิดขึ้นในกระพี้ไม้จะปรากฏสีเป็นสีน้ำตาลแดงและในแก่นไม้จะเป็นสีขาวหรือจุดน้ำตาลดำผสมกัน

**4.3.1.1.2 ความจำเป็นทางกายภาพของราที่ทำลายไม้และอาศัยอยู่ในเนื้อไม้**

ก. อุณหภูมิ (Temperature) โดยส่วนมากอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของราที่เกิดขึ้นในไม้จะอยู่ในช่วง 25 ° – 30 °C ในบางกรณีการเจริญเติบโตของราจะเจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิที่ลดลงต่ำกว่านี้บางทีอาจลดลงถึง 0 °C แต่ถ้าอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นจาก 0 °C จนถึงช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมราจะเจริญเติบโตได้รวดเร็วมาก ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 และโดยส่วนมากราที่เกิดขึ้นในไม้จะไม่สามารถทนอุณหภูมิได้สูงกว่า 40 °C ขึ้นไป แม้ว่าจะมีราบางชนิดทนได้ที่อุณหภูมิสูงได้แต่ช่วงเวลาการเจริญเติบโตของราจะสั้นลงหลังจากนั้นก็ตายไป อย่างไรก็ตามราจะสามารถทนต่อที่อุณหภูมิที่ต่ำได้ดีกว่าและยังคงมีชีวิตอยู่เพราะได้รับเกล็ดน้ำแข็งปกคลุม

ข. ออกซิเจน (Oxygen) ออกซิเจนเป็นส่วนสำคัญต่อการเจริญเติบโตของราโดยจะขับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำออกมาหลังจากรับออกซิเจนเข้าไปแล้ว ถ้าในกรณีที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอราก็จะผลิตแอลกอฮอล์และกรดออกซาลิคยิ่งถ้ามีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากก็จะยับยั้งการเจริญเติบโตของรา ดังนั้นราจึงจำเป็นที่จะได้รับปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตหรือถ้ามีออกซิเจนไม่เพียงพอราก็จะไม่สามารถเจริญเติบโตได้

ค. ความชื้น (Moisture) ความชื้นเป็นสิ่งจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของราซึ่งความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตจะอยู่ในช่วง 35 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ โดยความชื้นในสภาพเช่นนี้ที่เกิดขึ้นบนไม้ซึ่งจะพบว่าผนังเสี้ยนไม้จะอิ่มตัวด้วยน้ำและโพรงของเสี้ยนไม้จะมีการใช้ประโยชน์ในการแลกเปลี่ยนก๊าซต่าง ๆ ที่ใช้ในการเจริญเติบโตซึ่งถ้าไม่ไม่มีความชื้นอยู่เลยราก็จะไม่สามารถเจริญเติบโตได้ โดยทั่วไปจะสมมติว่าไม้จะไม่ถูกทำลายโดยราเมื่อความชื้นของเสี้ยนไม้มีค่าต่ำกว่าจุดเสี้ยนไม้อิ่มตัว ดังนั้นไม้ที่จะนำไปใช้งานให้ได้อย่างปลอดภัยควรมีความชื้นของไม้ให้ต่ำกว่าจุดเสี้ยนไม้อิ่มตัวประมาณ 2 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์

ง. สารอาหาร (Nutrients) สารอาหารที่จำเป็นโดยพื้นฐานต่อการเจริญเติบโตของรา ได้แก่ คาร์โบไฮเดรตและลิกนินที่เป็นส่วนประกอบของเนื้อไม้โดยใยของลิกนินจะไวต่อการเสื่อมสภาพเมื่อราผลิตเอ็นไซม์มาย่อยลิกนินเพื่อนำมาใช้เป็นอาหาร ส่วนไนโตรเจนที่เป็นส่วนประกอบทางแร่ธาตุของไม้ก็เป็นสารอาหารที่ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของราในไม้ เนื่องจากไนโตรเจนมีส่วนประกอบของวิตามิน B1 ที่เรียกว่า ไทอะมิน (Thiamine) และ ยังมีสารอาหารอื่น ๆ อีกอาทิเช่นฟอสฟอรัส โปตัสเซียม และ มักนีเซียม เป็นต้น

### 4.3.1.2 แมลงเจาะไม้

#### 4.3.1.2.1 ปลวก

ปลวกเป็นแมลงเจาะไม้ตัวสำคัญที่สุดในกลุ่มของแมลงชนิดต่าง ๆ บ่อยครั้งจะเข้าใจผิดเรียกกันว่า มดขาว (White ants) สามารถพบได้โดยทั่วไปทุกส่วนของโลกยกเว้นขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้เพราะปลวกต้องการอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโต

ก. ลักษณะโดยทั่วไปของปลวก ปลวกจะมีน้ำหนักเบาและเป็นแมลงเจาะไม้ที่ต้องการอาหารจำพวกเซลลูโลสเพราะในลำไส้ของปลวกมีโปรโตซัวที่ทำหน้าที่เป็นน้ำย่อยอาหารโดยย่อยเซลลูโลสของไม้ไว้เป็นอาหารให้ปลวกดังนั้นไม้จึงเป็นอาหารที่สำคัญอย่างมาก ปลวกจะมีร่างกายที่อ่อนแอต่ออุณหภูมิสูงและถ้าปริมาณออกซิเจนมีมากเกินไปที่จะทำลายโปรโตซัวที่อยู่ในลำไส้ของปลวก แต่ก็มีปลวกบางชนิดที่มีความทนทานต่อสภาพภูมิประเทศได้ดีคือ Termetidae เป็นปลวกชนิดหนึ่งที่ไม่ต้องการโปรโตซัวเพราะสามารถย่อยอาหารจำพวกเซลลูโลสได้เอง รังของปลวกจะอยู่ใต้ดินหรือในไม้ที่มีการสัมผัสกับดินโดยปลวกจะเริ่มสร้างโพรงที่อยู่ในดินเพื่อใช้เป็นทางเดินตลอดทางไปยังไม้หลังจากนั้นจะเริ่มทำลายไม้ที่สัมผัสกับดินที่มีความชื้นอยู่ ในสังคมของปลวกจะมีการแบ่งชั้นวรรณะเกิดขึ้นโดยปลวกงานจะทำหน้าที่บดหรือเคี้ยวเนื้อไม้ให้เป็นโพรงซึ่งลักษณะโดยทั่วไปของปลวกงานจะเป็นตัวสีขาวเหมือนน้ำนมตัวอ่อนเหมือนกับหนอน ไม่มีปีก ตาบอด หรือเป็นแมลงที่ไม่มีดวงตา และไม่มีหน้าที่ในการสืบพันธุ์ ปลวกทหารจะทำหน้าที่ป้องกันการโจมตีของศัตรูที่บุกรุกเข้ามาในรังของมันซึ่งลักษณะโดยทั่วไปจะมีขนาดใหญ่ หัวแข็งมีขากรรไกรทั้งสองข้างในการทำลายศัตรูที่อยู่ด้านหน้าแต่ร่างกายของปลวกทหารยังคงอ่อนแอต่อการถูกทำลายจากแมลงชนิดอื่นและสุดท้ายคือพญาปลวกหรือปลวกสืบพันธุ์ซึ่งจะทำหน้าที่ในการขยายพันธุ์ของปลวก ปลวกประเภทต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 และ ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับไม้จากการทำลายของปลวกสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 ดังนั้นไม้หรือของใช้ที่ทำจากไม้ที่ไม่ได้รับการดูแลจะถูกปลวกทำลายอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะไม้ที่เกิดจากการผุสลายด้วยราแล้วปลวกจะเข้ามาทำลายเนื้อไม้ได้อย่างง่ายดาย

ข. การควบคุมปลวก วิธีการป้องกันการรบกวนของปลวกดีที่สุดคือการอาบน้ำยาบนไม้ทั้งในงานไม้ที่สร้างขึ้นหรืองานไม้ที่กำลังต่อเติมจากงานเดิม ในด้านการออกแบบการก่อสร้างสำหรับงานไม้ประเภทต่าง ๆ ต้องทำลายปลวกที่อยู่บนดินก่อนเพราะปลวกจะเริ่มทำลายไม้ที่สัมผัสกับดินขึ้นหลังจากนั้นจึงเริ่มเคลื่อนตัวเข้ามาในเนื้อไม้เพื่อหาอาหารและสร้างรังอยู่ ถ้าพบปลวกขุดทำรังรอบ ๆ ฐานควรทำลายรังปลวกด้วยยาฆ่าแมลงหลังจากนั้นใช้น้ำมันดินทาลงไปรอบ ๆ ฐาน เพื่อลดความชื้นที่อยู่ภายในดินและเป็นการป้องกันไม่ให้ปลวกกลับมาทำรังใหม่อีกครั้ง ในการเลือกไม้เพื่อใช้ในการทำงานไม่ควรเลือกไม้ที่มีรอยร้าวกว้างมากกว่า 1 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันไม่ให้ปลวกมาอาศัยและทำลายเนื้อไม้ได้อีกต่อไป

#### 4.3.1.2.2 แมลงปีกแข็ง

ก. Lyctidae เป็นแมลงปีกแข็งที่มีลักษณะสีแดงอมน้ำตาลมีความยาวประมาณ 2 ถึง 7 มิลลิเมตร ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 เมื่อแมลงโตเต็มวัยบางครั้งมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า Lyctus เป็นแมลงที่พบได้ทั่วไปของโลก แมลงปีกแข็งชนิดนี้ชอบทำลายส่วนที่เป็นกระพี้ไม้หรือบางส่วนที่เป็นแก่นไม้โดยเริ่มจากตัวหนอนอ่อนที่แสดงไว้ดังรูปที่ 4.11 ไปทำลายส่วนที่เป็นกระพี้ไม้เนื่องจากมีธาตุอาหารจำพวกแป้งและน้ำตาลอยู่จำนวนมากดังนั้นจึงมีรูเกิดในกระพี้ไม้เป็นจำนวนมากซึ่งมากกว่าแก่นไม้ ตัวหนอนอ่อนจะเจริญเติบโตได้ดีเมื่อไม้มีความชื้นอยู่ในช่วง 10 ถึง 28 เปอร์เซ็นต์ และไม่สามารถเจริญเติบโตเมื่อความชื้นของไม้มีค่าต่ำกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ ปัจจัยอีกอย่างที่มีความสำคัญอย่างมากต่อผลกระทบของโครงสร้างไม้คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางช่องไม้ที่มีช่องว่างใหญ่เพียงพอที่แมลงปีกแข็งตัวเมียสามารถเข้าไปวางไข่ได้ ถ้าโครงสร้างไม้มีขนาดช่องว่างเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กมากแมลงปีกแข็งตัวเมียก็ไม่สามารถเข้าไปวางไข่ได้ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางช่องว่างของไม้ที่ทำให้แมลงตัวเมียวางไข่ได้จะมีขนาดมากกว่า 90 ไมโครเมตร ขึ้นไป เมื่อไข่ถูกวางอยู่ในช่องว่างของไม้ก็จะเริ่มฝักตัวเป็นตัวหนอนอ่อนโดยทำเป็นโพรงอยู่ในเนื้อไม้ในทิศขนานกับเสี้ยนไม้ ในช่วงเริ่มแรกตัวหนอนอ่อนจะขอนไชเป็นรูปกากบาทและต่อมาอีกหลายเดือนรูภายในที่ตัวหนอนอยู่ก็เริ่มยาวขึ้นสองถึงสามมิลลิเมตรเนื่องจากตัวหนอนอ่อนเริ่มกลายเป็นดักแด้ เมื่อเข้าสู่สภาวะโตเต็มวัยมันก็จะเริ่มกัดเนื้อไม้เพื่อที่จะออกมาสู่ผิวหน้าของไม้แล้วบินหนีออกไปจากโพรงไม้ที่เคยอยู่ วงจรชีวิตของแมลงปีกแข็งจะเริ่มกลับสู่สภาวะเดิมใหม่อีกครั้งเมื่อแมลงปีกแข็งเริ่มจับคู่แล้วผสมพันธุ์กันโดยแมลงปีกแข็งตัวเมียจะไปวางไข่อยู่ในเนื้อไม้ที่เคยอยู่หรือหาไม้ที่มีช่องว่างที่เพียงพอสำหรับวางไข่ ดังนั้นไม้ที่จะนำมาใช้ในงานโครงสร้างต่าง ๆ ควรจะมีผิวเรียบและถูกขัดมันด้วยขี้ผึ้งหรือทาสีเคลือบผิวไว้เพื่อป้องกันไม่ให้ไม้เกิดช่องว่างเพียงพอสำหรับการวางไข่ของแมลงปีกแข็ง ไม้ที่ถูกตัดเป็นท่อนและถูกทำลายโดยแมลงปีกแข็งจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.12

ซึ่งจะเกิดกากของผงละเอียดรอบ ๆ รู ช่วงวงจรชีวิตของแมลงปีกแข็งประเภท Lyctidae จะใช้เวลาประมาณหลายเดือนถึงหลายปีขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม อาหาร และความชื้นที่อยู่ในเนื้อไม้

ข. Anobiidae เป็นแมลงปีกแข็งที่สามารถพบได้โดยทั่วไปจัดเป็นแมลงปีกแข็งที่ชอบทำลายไม้โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างกันกับแมลงปีกแข็งประเภท Lyctus แมลงปีกแข็ง Anobiidae ชอบทำลายทั้งในส่วนที่เป็นกระพี้ไม้และแก่นไม้เพื่อนำมาใช้เป็นอาหารจัดเป็นแมลงที่ย่อยอาหารจำพวกเซลลูโลสโดยไม่ต้องใช้โปรโตซัว วงจรชีวิตของแมลงปีกแข็ง Anobiidae จะคล้ายคลึงกับแมลงปีกแข็งประเภท Lyctus โดยวงจรชีวิตจะมี 4 รูปแบบ คือ ไข่ ตัวหนอนอ่อน ดักแด้ และ ตัวโตเต็มวัย ซึ่งรูปที่ 4.13 จะแสดงตัวหนอนอ่อนและตัวโตเต็มวัยของแมลงปีกแข็งประเภท Anobiidae โดยไข่จะถูกวางไว้ในไม้ที่มีรอยแตกหรือโพรงไม้มากกว่าจะวางไว้ในเสี้ยนไม้เมื่อไข่เริ่มฝักเป็นตัวหนอนอ่อน ตัวหนอนอ่อนจะไม่ชอนไชไปมาเหมือนกับแมลงปีกแข็งประเภท Lyctus ซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 สำหรับวงจรชีวิตสำหรับแมลงปีกแข็ง Anobiidae จะใช้เวลาประมาณหนึ่งปีถึงสามปีขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม

ค. Cerabycidae เป็นแมลงปีกแข็งที่มีขนาดใหญ่ที่สร้างความเสียหายเกิดขึ้นกับไม้ การฟักไข่ของแมลงปีกแข็งประเภทนี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความชื้นในบรรยากาศ โดยระยะการฟักไข่อาจใช้เวลาสั้นเพียง 6 วัน หรือ อาจยาวนาน 48 วัน ถ้าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศมีค่าต่ำ แมลงปีกแข็ง Cerabycidae จะเจริญเติบโตได้ดีภายใต้อุณหภูมิปานกลางและความชื้นสัมพัทธ์บรรยากาศมีค่าสูง หลังจากฟักไข่ออกมาเป็นตัวหนอนอ่อนความยาวของตัวหนอนจะยาวประมาณ 35 มิลลิเมตร และฝังตัวอยู่ในรูของกระพี้ไม้โดยใช้เวลาประมาณสองถึงสิบเจ็ดปีก่อนจะเป็นดักแด้ซึ่งระยะเวลาช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับคุณภาพและปริมาณอาหารที่อยู่ในเนื้อไม้ หลังจากเป็นดักแด้ได้ประมาณสามอาทิตย์ขนาดของดักแด้จะเริ่มใหญ่โตพร้อมที่จะกลายเป็นตัวเต็มวัยที่มีลักษณะเป็นแมลงปีกแข็งสีดำ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 ส่วนความเสียหายที่เกิดจากแมลง Cerabycidae จะแสดงไว้ดังรูปที่ 4.16

ง. Bostrichidae จัดเป็นกลุ่มแมลงปีกแข็งที่พบมากในเขตอบอุ่นและในบางส่วนของซีกโลกเหนือเป็นแมลงปีกแข็งที่ทำลายเศรษฐกิจของประเทศ ทั้งตัวเต็มวัยและตัวหนอนอ่อนมีความสามารถในการเจาะทำลายเนื้อไม้โดยจะไม่วางไข่ไว้ในโพรงของเสี้ยนไม้หรือรอยแตกของไม้แต่จะวางไว้ตามรูทางเดินของตัวเต็มวัยที่เคยอาศัยอยู่เดิมและแป้งที่อยู่ในเนื้อไม้จัดเป็นอาหารที่สำคัญสำหรับตัวหนอนอ่อน

จ. การควบคุมแมลงปีกแข็ง วิธีที่จะควบคุมการสูญเสียไม้จากการทำลายของแมลงเจาะไม้เราต้องทำความเข้าใจลักษณะและพฤติกรรมของแมลงประเภทต่าง ๆ ที่กล่าวไว้ อาทิเช่น กระพี้ไม้ไม่ควรนำมาใช้ในงานโครงสร้างไม้เนื่องจากกระพี้ไม้เป็นส่วนอ่อนและเหมาะสำหรับเป็นอาหารของแมลงปีกแข็ง ความชื้นของไม้เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของแมลงปีกแข็งก่อนนำไม้ไปใช้ควรนำไม้ไปอบแห้งก่อนเพื่อเป็นการป้องกันในช่วงแรกหรือจะทำการปิดช่องว่างโพรงของเสี้ยนไม้ด้วยสารเคมีสำเร็จรูปด้วยขบวนวิธีการพ่นหรือการจุ่มก็ได้

#### 4.3.1.2.3 มดเจาะไม้

มดเจาะไม้จัดเป็นสังคมแมลงกลุ่มหนึ่งที่ทำลายเนื้อไม้เพื่อนำไม้ไปใช้งาน ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.17 มดเจาะไม้จะมีการสร้างรังแตกต่างจากปลวกโดยมดเจาะไม้จะไม่นำเนื้อไม้เป็นอาหารแต่จะทำลายโพรงของเสี้ยนไม้เพื่อใช้ทำเป็นทางเดิน โดยมดเจาะไม้จะนำส่วนที่อ่อนของไม้ออกแล้วนำเศษไม้หรือเศษดินจากภายนอกรังมาทำรัง ดังแสดงไว้ดังรูปที่ 4.18 โดยทางเดินของมดเจาะไม้จะสะอาดและเรียบร้อยกว่าเมื่อเทียบกับรังของปลวก มดเจาะไม้เป็นแมลงที่ชอบไม้ที่มีความชื้นเพื่อใช้ในการทำรังดังนั้นถ้าเราดูแลไม้ให้แห้งอยู่ตลอดเวลาจะเป็นการป้องกันความเสื่อมสภาพของไม้ในช่วงแรก และห้ามนำชิ้นส่วนของไม้สัมผัสกับดินเพราะดินมีความชื้นอยู่ซึ่งไม้สามารถดูดความชื้นจากดินได้ ในบางกรณีมดเจาะไม้มาก่อสร้างรังขึ้นบนไม้จึงควรใช้ยาฆ่าแมลงฉีดเข้าไปในเนื้อไม้เพื่อทำลายรังมดเจาะไม้และเป็นการป้องกันเนื้อไม้ให้สามารถใช้งานได้อีกยาวนาน

### 4.3.1.3 การประมาณค่าการสูญเสียกลสมบัติของไม้

ปัจจุบันไม้ที่ผลิตเป็นคอนไม้แขวนเคเบิลยังเป็นไม้ใหม่ที่มีอายุการตัดยังน้อยและเป็นไม้ที่นำมาใช้ทดแทนคอนไม้แขวนเคเบิลเดิมที่ผุสลายและเสียหายไปโดยข้อมูลการประมาณค่าการสูญเสียกลสมบัติของไม้ของคอนไม้แขวนเคเบิลใหม่มีน้อยมากเนื่องจากเป็นไม้ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ดังนั้นจำเป็นต้องทำการประเมินค่าการสูญเสียกลสมบัติของไม้จากความเสื่อมสภาพที่เกิดจากราด้วยวิธี การหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของไม้ (Weight loss) โดยเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเดิม สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.8 โดยตางรางที่ 4.7 เป็นไม้ที่เกิดจากการทำลายโดยราน้ำตาล และ ตารางที่ 4.8 เป็นไม้ที่เกิดจากการทำลายโดยราสีขาว ขณะที่ความเสื่อมสภาพของไม้ที่เกิดจากการทำลายของแมลงเจาะไม้ เช่น ปลวก แมลงปีกแข็ง และมดเจาะไม้ ยังไม่ปรากฏลักษณะความเสียหายเกิดขึ้นกับไม้ที่ผลิตเป็นคอนไม้แขวนเคเบิลเนื่องจากคอนไม้แขวนเคเบิลที่แขวน

ร่วมกับเสาไฟฟ้าเป็นไม้เนื้อแข็งที่เป็นส่วนมาจากแก่นไม้ ติดตั้งในพื้นที่โล่ง และไม่ได้สัมผัสกับดิน

### 4.3.2 คอนเหล็กรูปตัวซีกับกลไกการกัดกร่อนในชั้นบรรยากาศ

คอนเหล็กรูปตัวซีเป็นโครงสร้างเหล็กรูปพรรณที่มีการชุบผิวสังกะสีโดยวิธีการจุ่มร้อนกัลวาไนซ์โดยค่าเฉลี่ยของความหนาของสังกะสีต้องไม่น้อยกว่า 120 ไมโครเมตร การชุบผิวเหล็กด้วยสังกะสีด้วยวิธีการจุ่มร้อนเป็นขบวนการเคลือบผิวโลหะโดยนำชิ้นโลหะที่ต้องการมาลงบ่อที่หลอมเหลวด้วยสังกะสี ขบวนการนี้เป็นวิธีที่ใช้ป้องกันการกัดกร่อนของโลหะจากสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดีซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมากกว่าหลายปีมาแล้ว โดยส่วนประกอบทางเคมีของสังกะสีที่ใช้เคลือบผิวโลหะจะต้องมีความบริสุทธิ์ของสังกะสีที่ใช้เครื่องมือวิเคราะห์จากแท่งสังกะสี (Ingot) ที่ไม่ควรน้อยกว่าร้อยละ 98

#### 4.3.2.1 โครงสร้างการชุบสังกะสี

การชุบสังกะสีด้วยวิธีการจุ่มร้อน (Hot dip zinc coatings) มีส่วนประกอบของชั้นผิวชุบต่าง ๆ อยู่หลายชั้น โดยจะเริ่มที่ผิวโลหะเหล็กซึ่งจะมีชั้นโลหะผสมระหว่างเหล็กและสังกะสี (Iron-zinc) ในแต่ละชั้น แต่อย่างไรก็ตามส่วนผสมของเหล็กที่ผสมอยู่นั้นยังคงมีอยู่จำนวนน้อยจนกระทั่งถึงผิวชั้นนอกสุดก็จะเป็นชั้นของสังกะสีบริสุทธิ์ ในการชุบผิวโลหะด้วยสังกะสีจะมีสารผสมเพิ่มจำพวกอลูมิเนียมอยู่ประมาณ 0.1 ถึง 0.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะระงับการเกิดชั้นโลหะผสมระหว่างเหล็กและสังกะสีเพราะที่ต้องการให้เกิดขึ้นบนผิวชุบจะต้องเป็นสังกะสีบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียว ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 ผิวชุบสังกะสีจะป้องกันโลหะจากการกัดกร่อนด้วยกันสองรูปแบบ คือ แบบแรก สังกะสีจะถูกกัดกร่อนในอัตราที่ช้ามาก ๆ เมื่อเทียบกับเหล็กที่เกิดขึ้นในสภาวะแวดล้อมโดยทั่วไปซึ่งผิวชุบสังกะสีจะทำหน้าที่เป็นตัวกีดขวาง (Barrier) ที่ดี และ แบบที่สอง คือ สังกะสีจะเป็นตัวป้องกันการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีระหว่างเหล็กกับสภาวะแวดล้อมโดยทั่วไปเมื่อสังกะสีจับคู่โลหะเหล็ก สังกะสีจะทำหน้าที่เป็นแอโนด (Anode) จะป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กตลอดอายุการใช้งานของสังกะสีหรือในทางปฏิบัติหมายความว่าโลหะเหล็กที่ชุบด้วยสังกะสีจะไม่เกิดสนิมเหล็กจนกระทั่งสังกะสีถูกกัดกร่อนไปจนหมด

#### 4.3.2.2 กลไกการกัดกร่อน

ในสภาพอากาศที่แห้งสังกะสีที่เคลือบผิวเหล็กจะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นออกไซด์ของสังกะสี (ZnO) เมื่อได้รับความชื้นจากอากาศก็จะเกิดปฏิกิริยาจาก ZnO กลายเป็น

ไฮดรอกไซด์ของสังกะสี ($Zn(OH)_2$) อย่างไรก็ตาม $Zn(OH)_2$ สามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ในบรรยากาศก่อให้เกิดคาร์บอเนตสังกะสีพื้นฐาน ($ZnCO_3$) ซึ่ง $ZnCO_3$ จะเป็นสสารพื้นฐานที่ใช้ป้องกันการกัดกร่อนของโลหะเหล็ก

### 4.3.2.3 ความต้านทานการกัดกร่อนในชั้นบรรยากาศต่าง ๆ

ความต้านทานต่อการกัดกร่อนในชั้นบรรยากาศต่าง ๆ ของโลหะเหล็กชุบสังกะสีมีการเผยแพร่มากกว่าหลายปีผ่านมาแล้วที่สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ กัน การกัดกร่อนของสังกะสีจะถูกพบว่าเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับเวลา ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.20 โดยจะแสดงถึงความสัมพันธ์ปีที่เริ่มเกิดสนิมเหล็กกับน้ำหนักผิวชุบเฉลี่ยของสังกะสีที่บรรยากาศต่าง ๆ กัน ในการนำ เหล็ก สังกะสี หรือ เหล็กผิวชุบสังกะสีด้วยวิธีจุ่มร้อนไปใช้งานในสภาวะบรรยากาศต่าง ๆ กันได้มีการศึกษาอย่างยาวนาน ซึ่งพฤติกรรมของวัสดุต่าง ๆ ในสภาวะแวดล้อมที่กำหนดสามารถประมาณการใช้งานได้แต่การจะหาคำตอบที่แท้จริงของวัสดุที่นำไปใช้งานว่ามีอายุการใช้งานยาวนานมากเพียงใดค่อนข้างจะสลับซับซ้อนเนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างมาเป็นตัวกำหนด อาทิเช่น ความถี่และช่วงเวลาที่เกิดความชื้น เช่น น้ำฝนหรือน้ำค้าง รูปแบบและปริมาณมลพิษที่มีอิทธิพลต่อการกัดกร่อน ทิศทางลม ความเร็วลม หรือแม้กระทั่งไอของน้ำทะเล ปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดรูปแบบหรือเป็นตัวแทนในสถานภาพการกัดกร่อนเพื่อใช้หาอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับผิวชุบสังกะสี รูปที่ 4.21 จะแสดงผลทดสอบการนำไปใช้งานในบรรยากาศนอกสถานที่โดยวัดอายุการใช้งานที่ใช้ป้องกันผิวชุบสังกะสีในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ อาทิเช่น โรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ (Heavy industrial) โรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง (Moderate industrial) หรือ ในเมือง (Urban) นอกเมือง (Suburban) ชนบท (Rural) และทะเล (Marine) ในการแบ่งสถานที่แตกต่าง ๆ กันเพราะมีปัจจัยและอิทธิพลที่สำคัญต่อการกัดกร่อนของผิวชุบสังกะสี

ก. สภาวะแวดล้อมในโรงงานอุตสาหกรรมและในเมือง (Industrial and urban environment) การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในพื้นที่ที่เป็นเขตอุตสาหกรรมที่พัฒนาแล้วขั้นสูงซึ่งพื้นที่บริเวณนี้มักจะมีการปล่อยสารพิษประเภท ซัลเฟอร์ ควัน และ หมอกพิษ สู่บรรยากาศ โดยกลุ่มสารพิษที่เกิดขึ้นนี้จะทำปฏิกิริยากับฟิล์มของ $ZnCO_3$ ที่ยึดติดอยู่บนผิวชุบสังกะสีกลายเป็น $ZnSO_4$ และ $ZnSO_4$ จะถูกกำจัดหรือชะล้างออกไปจากผิวชุบสังกะสีเมื่อได้รับความชื้นจากอากาศ

ข. ชนบทและนอกเมือง (Rural and Suburban) อัตราการกัดกร่อนในพื้นที่เขตบริเวณนี้มักจะเกิดขึ้นช้าเมื่อเทียบกับพื้นที่เขตอุตสาหกรรม โดยจะเริ่มจากสภาวะอากาศที่

เกิดขึ้นในพื้นที่บริเวณนี้ทำปฏิกิริยากับสังกะสีพื้นฐาน $ZnCO_3$ ที่ผิวชุบสังกะสี จะได้สารประกอบที่ละลายน้ำได้มีผลทำให้ผิวชุบสังกะสีเกิดการกัดกร่อนขึ้น

ค. สภาพบรรยากาศทะเล (Marine atmospheres) อัตราการกัดกร่อนของสังกะสีและเหล็กในสภาพบรรยากาศทะเลได้รับอิทธิพลจากปัจจัยหลักหลาย ๆ อย่าง อาทิเช่น ไอน้ำเกลือ ทิศทางลม ภูมิประเทศ และ ความใกล้ของชายฝั่งทะเล ซึ่งผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนของสังกะสีในสภาวะบรรยากาศชายทะเลที่ได้คือ ซิงค์คลอไรด์ $ZnCl_2$

ง. คุณสมบัติของน้ำทะเลและไอน้ำเกลือ (Seawater and salt spay performance) ตารางที่ 4.9 จะกำหนดค่าประมาณอัตราการกัดกร่อนของสังกะสีในน้ำประเภทต่าง ๆ และรูปที่ 4.22 จะแสดงถึงการทำนายอายุการใช้งานของผิวชุบสังกะสีในพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลของไอน้ำเกลือ ทะเลซึ่งมีส่วนประกอบของโซเดียมคลอไรด์เป็นส่วนมากและยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ ที่เจือปน เช่น คัลเซียม มักนีเซียม และ เกลือของมักนีเซียม ค่า pH ส่วนใหญ่จะมีค่าประมาณ 8

จ. คุณสมบัติของน้ำบริสุทธิ์ (Freshwater performance) กลไกการป้องกันการกัดกร่อนของสังกะสีในน้ำบริสุทธิ์จะมีลักษณะคล้ายกันกับการนำไปใช้งานในสภาพบรรยากาศทั่วไป อัตราการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับความสามารถของผิวชุบสังกะสีที่เป็นเกลือสังกะสีพื้นฐานที่ยึดเกาะชั้นผิวชุบสังกะสีไว้อยู่ ซึ่งจะเป็นชั้นป้องกันไม่ให้ออกซิเจนสามารถแพร่กระจายเข้าไปได้ทำให้อัตราการกัดกร่อนเกิดขึ้นได้ช้า และ การกัดกร่อนของสังกะสีในน้ำยังมีปัจจัยอื่นที่เป็นตัวส่งเสริมการกัดกร่อนอีก อาทิเช่น ค่า pH ของน้ำ สิ่งเจือปน ความเป็นเบส และ สารแขวนลอยที่ไม่ละลายน้ำ ตารางที่ 4.10 จะแสดงถึงรูปแบบของน้ำประเภทต่าง ๆ ที่มีผลต่อการกัดกร่อนของสังกะสี

ฉ. อุณหภูมิของน้ำ (Water temperature) อัตราการกัดกร่อนของสังกะสีในน้ำซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่าง 65 °C ถึง 70 °C โดยอุณหภูมิที่ช่วงนี้จะมีค่าอัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นและลดลง ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.23

ช. pH ของน้ำ (Water pH) อัตราการกัดกร่อนจะลดลงเมื่อ pH ของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นและจะทำให้อัตราการกัดกร่อนเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อ pH ของน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 12 ถึง 12.5 แต่ส่วนมากน้ำจะมี pH อยู่บริเวณ 6 ถึง 8 อย่างไรก็ตาม pH ของน้ำมีผลต่อการกัดกร่อนของผิวชุบสังกะสีน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของอิออนต่าง ๆ ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ

จากการทดสอบการกัดกร่อนของคอนเหล็กรูปตัวซีในสภาวะเร่งทดสอบพบว่าอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับคอนเหล็กรูปตัวที่เป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กมีค่าเท่ากับ 8.173 mpy (จากภาคผนวก ง) เราสามารถนำคอนเหล็กรูปตัวซีที่เป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กจากการทดสอบการกัดกร่อนสภาวะเร่งทดสอบมาเป็นแบบจำลองแทนคอนเหล็กรูปตัวซีขนาดจริงที่เราไม่สามารถหาน้ำหนักที่สูญหายเกิดขึ้นได้เนื่องจากคอนเหล็กรูปตัวซีขนาดจริงมีน้ำหนักมาก จากคอนเหล็กรูปตัวซีขนาดจริงจะมีการชุบผิวสังกะสีที่ไม่น้อยกว่า 120 ไมโครเมตร นั้น เมื่ออ่านภราฟอายุการใช้งานที่สัมพันธ์กับความหนาของผิวชุบสำหรับเหล็กที่ชุบผิวด้วยสังกะสีในสภาวะบรรยากาศภาคโรงงานอุตสาหกรรมหนักที่ให้ค่าการกัดกร่อนรุนแรงสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 4.21 พบว่าค่าอายุการใช้งานของคอนเหล็กรูปตัวซีจะมีค่าประมาณ 20 ปี จึงเริ่มจะเกิดสนิมหรือให้ค่าอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 120 / (25.4 x 20) = 0.236 mpy ซึ่งสิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าค่าต่ำสุดที่จะเริ่มเกิดสนิมเหล็กได้ต้องมีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.236 mpy ในขณะที่การทดสอบสภาวะเร่งการกัดกร่อนของคอนเหล็กรูปตัวซีที่เป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กซึ่งเป็นแบบจำลองแทนคอนเหล็กรูปตัวซีขนาดจริงจะให้ค่าอัตราการกัดกร่อน 8.173 mpy นั่นคือคอนเหล็กรูปตัวซีขนาดจริงได้เกิดสนิมเหล็กไปแล้ว เมื่อนำคอนเหล็กรูปตัวซีมาทำการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสถิตย์ปรากฏว่าน้ำหนักบรรทุกดรากและน้ำหนักบรรทุกประลัยมีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักบรรทุกดรากเฉลี่ยและน้ำหนักบรรทุกประลัยเฉลี่ยจากการทดสอบของคอนเหล็กรูปตัวซีทั้ง 30 ตัวอย่าง ถ้านำคอนเหล็กรูปตัวซีไปใช้ในงานสภาวะแวดล้อมบรรยากาศการกัดกร่อนทั่วไปคาดว่าสนิมเหล็กที่เกิดขึ้นบนผิวของคอนเหล็กรูปตัวซีที่มีผิวชุบสังกะสีไม่น้อยกว่า 120 ไมโครเมตรคงใช้เวลาเร็วสุดประมาณ 20 ปี โดยที่ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกการใช้งานของคอนเหล็กรูปตัวซียังคงเดิมตลอดอายุการใช้งานแม้ว่าจะเริ่มเกิดสนิมขุมบนผิวคอนเหล็กรูปตัวซีแล้วก็ตาม

### 4.3.3 คอนกรีตอัดแรงสัมผัสกับกลไกการกัดกร่อนในเหล็กแรงดึงสูง

#### 4.3.3.1 เหล็กเสริมที่อยู่ในวัสดุซีเมนต์

พฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่สัมผัสกับวัสดุจำพวกซีเมนต์ ได้แก่ มอร์ต้าและคอนกรีตนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ วัสดุปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จัดเป็นวัสดุจำพวกที่ออกฤทธิ์เป็นเบส เนื่องจากปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีส่วนผสมของสารจำพวก ดัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และ เกลือเบสของสารละลายอื่น ๆ ปนอยู่ ค่า pH ของสารละลายดัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อิ่มตัวจะมีค่าประมาณ 12.5 ซึ่งจากไดอาแกรมปูเบก์ (Pourbaix diagram) ดังแสดงในรูปที่ 4.24 พบว่าภายใต้สภาพแวดล้อมโดยทั่วไปที่มีความชื้นและออกซิเจนอยู่ในบรรยากาศที่กระทำผ่านคอนกรีตเสริมเหล็ก เหล็กเสริมจะอยู่

ในสภาพพาสสิฟ (Passive condition) โดยจะมีการเกิดฟิล์มป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ซึ่งฟิล์มที่เกิดขึ้นนี้เป็นออกไซด์มาเกาะบนผิวเหล็กเสริมซึ่งโดยทั่วไปพิจารณาเป็น $\gamma FeOOH$ ที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อนเหล็กเสริมที่อยู่ภายในคอนกรีต ผลกระทบของ pH ที่มีต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่สภาวะน้ำในบรรยากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.25 พบว่าอัตราการกัดกร่อนจะลดลงเมื่อ pH มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากคอนกรีตโดยปกติจะมีค่า pH มากกว่า 12.5 ดังนั้นส่งผลทำให้อัตรากัดกร่อนในเหล็กเสริมแทบเกิดขึ้นน้อยมาก นอกจากพฤติกรรมของเหล็กเสริมในคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับค่า pH แล้วยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริม คือ คาร์บอเนต และ คลอไรด์

ก. คาร์บอเนต เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคัลเซียมไฮดรอกไซด์ และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศโดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ คัลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) มีผลทำให้ค่า pH ของคอนกรีตมีค่าลดลง ซึ่งภายใต้สภาวะแวดล้อมเช่นนี้เหล็กเสริมจะไม่สามารถเกิดสภาพพาสสิฟแต่จะเกิดเป็นสภาพแอคทิฟ (Active condition) แทน เนื่องจากฟิล์มที่ยึดเกาะบนผิวเหล็กเสริมถูกทำลายไปทำให้เหล็กเสริมเกิดการกัดกร่อนในสภาพบรรยากาศทั่ว ๆ ไป คาร์บอเนตที่เกิดขึ้นจะเป็นฟังก์ชันของความพรุนในเนื้อคอนกรีตและเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ ในการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตจากสภาวะคาร์บอเนตสำหรับทางปฏิบัตินิยมใช้การเคลือบผิวเหล็กเสริมด้วยสังกะสี

ข. คลอไรด์ ถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมของคอนกรีต โดยแหล่งที่อาจจะพบคลอไรด์ในขบวนการผสมคอนกรีต ได้แก่ วัสดุดละ น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตซึ่งบางสถานที่อาจจะเป็นแหล่งน้ำที่มีรสเค็มหรือน้ำกร่อย สารผสมเพิ่มที่ใช้เร่งการเซ็ทตัวของคอนกรีตที่มีสารจำพวก คัลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) และ บรรยากาศชายทะเล เป็นต้น

สำหรับคอนกรีตที่ไม่มีปฏิกิริยาคาร์บอเนตเกิดขึ้นปริมาณของคลอไรด์ที่จะเป็นสาเหตุในการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะเริ่มต้นที่คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีต การกัดกร่อนของเหล็กเสริมจะเกิดขึ้นเมื่อระดับของคลอไรด์มีปริมาณ 0.02 ถึง 0.04 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักคอนกรีตที่อยู่ระหว่างผิวหน้าเหล็กเสริมโดยที่คลอไรด์จะซึมผ่านเข้าไปจากผิวนอกของคอนกรีต อย่างไรก็ตามก็มีข้อกำหนดของ American Concrete Institute Committee 201 ที่กำหนดระดับของคลอไรด์สูงสุดผสมเข้ากับคอนกรีตในสภาวะต่าง ๆ กัน ดังแสดงได้ในตารางที่ 4.11

ผลการกัดกร่อนของเหล็กเสริมแรงดึงสูงสำหรับคอนกรีตอัดแรงอาจแตกต่างจากคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป เนื่องจากเหล็กเสริมแรงดึงสูงมีค่ากำลังดึงประลัยมากกว่า 14,060 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (1380 MPa) เหล็กเสริมแรงดึงสูงนี้จะอ่อนไหวต่อการกัดกร่อนโดยเฉพาะปัญหาการกัดกร่อนแบบ Hydrogen embrittle การกัดกร่อนในลักษณะเช่นนี้จะเกิดกับเหล็กที่มีกำลังรับแรงดึงที่สูงโดยจะเกิดขึ้นจากการที่โลหะเหล็กดูดซับไฮโดรเจนในรูปอะตอมที่อาจมาจากแหล่งกำเนิดของสารพิษในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น สารหนู ไซยาไนด์ และ ฟอสฟอรัส โดยจะซึมเข้าไปในช่องว่างหรือที่เป็นจุดอ่อนของเหล็ก เมื่อไฮโดรเจนเข้าไปแล้วจะรวมตัวเป็นโมเลกุลซึ่งจะเกิดแรงดันทำให้โลหะเหล็กเกิดการบวมหรือสูญเสียความยืดหยุ่นจนเกิดความเปราะและแตกร้าวภายในเนื้อเหล็ก ดังนั้นมีผลทำให้เกิดการสูญเสียแรงอัดโดยรอบของคอนกรีต

#### 4.3.3.2 การป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ซีเมนต์โดยทั่วไปจะป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตอยู่บ้างดังที่กล่าวไปแล้ว ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลอย่างมากต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตคือ อิทธิพลของคาร์บอเนตและการซึมผ่านของคลอไรด์ ภายใต้สภาวะการณ์ทั้งสองนี้เมื่อฟิล์มออกไซด์ที่ป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมถูกทำลายอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจะเกิดขึ้นเพียงพอที่จะทำให้หน้าตัดของเหล็กเสริมมีขนาดเล็กลงได้และก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ของการกัดกร่อนรอบ ๆ เหล็กเสริมทำให้ผิวคอนกรีตอาจหลุดล่อน

สิ่งหนึ่งที่จะป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่เกิดขึ้น คือ การวางตำแหน่งของเหล็กเสริมให้มีระยะหุ้มคอนกรีตหนาเพียงพอที่จะลดความรุนแรงและการซึมผ่านของคลอไรด์หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึงผิวเหล็กเสริม เนื่องจากความลึกหรือความทึบของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่ส่งผลกระทบถึงเวลาเริ่มต้นที่เหล็กเสริมจะถูกการกัดกร่อน การป้องกันการกัดกร่อนคือต้องมั่นใจว่าคอนกรีตมีระยะหุ้มเหล็กเสริมที่เพียงพอ โดยทั่วไปจะกำหนดที่ระยะ 50 มิลลิเมตร หรือ 2 นิ้ว จากผิวของคอนกรีตถึงตำแหน่งของเหล็กเสริม และต้องให้คอนกรีตมีส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์ต่ำสุดเท่าที่เป็นไปได้เพื่อให้ความพรุนหรือโพรงในเนื้อคอนกรีตมีค่าน้อยที่สุดและลดการแพร่กระจายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และคลอไรด์ ในมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ วสท. ปี 2537 ได้กำหนดระยะหุ้มของคอนกรีตที่น้อยที่สุดสำหรับเหล็กเสริมธรรมดา เหล็กเสริมแรงดึงสูง ท่อร้อยเหล็กเสริมแรงดึงสูง และ อุปกรณ์ยึดเหล็กในงานคอนกรีตอัดแรง ตามตารางที่ 4.12

สิ่งที่สองเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นกับสภาวะแวดล้อมชายทะเล ซึ่งเป็นการนำคอนกรีตอัดแรงไปใช้ในงานที่มีแหล่งเกลือเข้มข้นสูง ระยะหุ้มคอนกรีตและชนิดของคอนกรีตบางครั้งเราไม่มั่นใจได้ว่าจะต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ตลอดอายุการใช้งาน ดังนั้นจึงต้องมีการป้องกันเหล็กเสริมจากการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมการกัดกร่อนต่าง ๆ ด้วยการชุบผิวเหล็กเสริมด้วยวัสดุต้านทานการกัดกร่อน อาทิเช่น การเคลือบผิวเหล็กเสริมด้วยอีพอกซี (Epoxy coating) หรือ ชุบผิวเหล็กเสริมด้วยโลหะ (Metallic coating) การเคลือบผิวเหล็กเสริมด้วยอีพอกซีเป็นวิธีการใช้ไฟฟ้าสถิตย์กระทำผ่านผงอีพอกซีเพื่อไปเคลือบที่ผิวเหล็กเสริมโดยที่วัสดุทั้งสองจะหลอมเป็นเนื้อเดียวกันเป็นวิธีที่แยกเหล็กไม่ให้สัมผัสกับความชื้น ออกซิเจน และ คลอไรด์ ทำให้เหล็กเสริมไม่เกิดการกัดกร่อน อย่างไรก็ตามการใช้วิธีการเคลือบผิวด้วยอีพอกซีส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตมีค่าลดลง โดยทั่วไปข้อกำหนดที่ป้องกันไม่ให้แรงยึดเหนี่ยวมีค่าลดลงจะกำหนดให้ความหนาผิวเคลือบของอีพอกซีอยู่ในช่วงระหว่าง 0.18 $\pm$ 0.05 มิลลิเมตร (7 $\pm$ 2 mils) เป็นต้น ส่วนการชุบผิวเหล็กเสริมด้วยโลหะโดยทั่วไปนิยมใช้โลหะประเภท สังกะสีหรือนิเกล การชุบผิวเหล็กเสริมด้วยสังกะสีจะเป็นวิธีที่นิยมกันมากกว่า ซึ่งส่วนมากจะเป็นการชุบผิวเหล็กเสริมด้วยวิธีการจุ่มร้อนด้วยกัลวาไนซ์ -- ปัจจัยที่ใช้กำหนดหาอัตราการกัดกร่อนของสังกะสีหรือเหล็กเสริมชุบผิวด้วยสังกะสีในคอนกรีตคือกับฟิล์มป้องกัน (Protective films) ที่เกาะบนผิวเหล็กที่ชุบด้วยสังกะสี ฟิล์มป้องกันนี้จะมีความเสถียรภาพและเกิดอัตราการกัดกร่อนต่ำสุดเมื่อ pH มีค่าประมาณ 6 ถึง 12.5 ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.26 สิ่งที่น่าสนใจเมื่อ pH ของคอนกรีตปราศจากสภาวะคาร์บอเนตจะให้ค่า pH ของคอนกรีตมีค่า 12.5 ที่เป็นค่าต่ำสุดสำหรับอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมชุบผิวด้วยสังกะสี แต่เมื่อมีคาร์บอเนตเกิดขึ้นในคอนกรีตจะทำให้ค่า pH ของคอนกรีตจะมีค่าต่ำกว่า 10 ซึ่งอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมชุบผิวด้วยสังกะสีจะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 0.5 ถึง 0.8 μm/yr (0.02 ถึง 0.03 mils/yr) ดังนั้นการใช้เหล็กเสริมชุบผิวด้วยสังกะสีเมื่อใช้กับคอนกรีตที่มีคาร์บอเนตจะพบว่าเหล็กเสริมที่ชุบผิวด้วยสังกะสีหนา 64 μm (2.5 mils) จะมีอายุการใช้งานถึง 80 ปี ภายใต้คอนกรีตที่มีคาร์บอเนต ส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กที่ชุบผิวด้วยสังกะสีภายใต้สภาวะการกัดกร่อนของคลอไรด์พบว่าคลอไรด์ที่มาจากการเพิ่มขึ้นของมอร์ต้าในช่วงระหว่างการผสมคอนกรีตอัตราการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นกับผิวชุบสังกะสีประมาณ 0.5 μm/yr (0.02 mils/yr) เมื่อส่วนผสมคลอไรด์มีค่า 0.15 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมอร์ต้า อย่างไรก็ตามถ้าคอนกรีตมีส่วนผสมของคาร์บอเนตร่วมด้วยอัตราการกัดกร่อนของสังกะสีจะเพิ่มขึ้น 10 μm/yr (0.4 mils/yr) ดังนั้นถ้ามาตรฐานการชุบผิวเหล็กเสริมด้วยสังกะสีที่มีความหนา 64 μm (2.5 mils) จะให้อายุการใช้งานของเหล็กเสริมของคอนกรีต 6.5 ปีเท่านั้น ส่วนผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับผิวเหล็กเสริมระหว่างสังกะสีกับคลอไรด์จะได้สารประกอบของซิงค์ไฮดรอกซีคลอไรด์ซึ่งมีส่วนทำให้เกิดรอยร้าวผิวล่างของคอนกรีตเกิดขึ้นได้ ดังนั้นการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมแรงดึงสูงของคอนกรีตอัดแรงสืบเนื่องจากสภาวะการกัดกร่อนของคาร์บอเนตและคลอไรด์ควร

นำเหล็กเสริมแรงดึงสูงชุบผิวด้วยสังกะสีที่หนาไม่น้อยกว่า 200 ไมโครเมตร ซึ่งจะให้อายุการใช้งานของคอนกรีตอัดแรงสปันยาวนาน 20 ปี จึงเริ่มเกิดสนิมบนเหล็กเสริมแรงดึงสูง

## 4.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความล้าภายใต้แรงกระทำเป็นวัฏจักร

ความล้าเป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุได้รับน้ำหนักบรรทุกเป็นวัฏจักรจะเกิดการวิบัติเมื่อหน่วยแรงมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงคราก การวิบัติโดยปกติจะเริ่มจากรอยร้าวเพียงจุดเล็ก ๆ แล้วขยายใหญ่ขึ้นจนถึงขั้นวิบัติในเวลาอันรวดเร็ว ความล้าที่เกิดขึ้นกับคอนแขวนเคเบิลเกิดจากสาเหตุการกระทำของแรงลมที่พัดผ่านต่อสายเคเบิลโทรศัพท์ทำให้สายเคเบิลโทรศัพท์เกิดการแกว่งไปมาส่งผลทำให้ปลายทั้งของคอนแขวนเคเบิลได้รับน้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นวัฏจักร เมื่อทำการวิเคราะห์ผลของแรงลมที่ทำให้ปลายทั้งสองข้างของคอนแขวนเคเบิลต้องรับน้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นวัฏจักรโดยรวมผลของน้ำหนักบรรทุกของสายเคเบิลในแนวดิ่ง ผลลัพธ์ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่กระทำต่อปลายแต่ละข้างของคอนแขวนเคเบิลมีค่าเท่ากับ 414 กิโลกรัม ซึ่งเป็นแรงลมที่กระทำต่อสายเคเบิลที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางรวมเท่ากับ 100 มิลลิเมตร และ ระยะห่างระหว่างช่วงของเสาไฟฟ้าเท่ากับ 25 เมตร ดังนั้นจุดรองรับที่กึ่งกลางคอนแขวนเคเบิลจะต้องรับน้ำหนักบรรทุกเป็นสองเท่าของน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นจากผลของแรงลมที่กระทำต่อปลายทั้งสองข้างของคอนแขวนเคเบิลโดยมีค่าเท่ากับ 828 กิโลกรัม อย่างไรก็ตามการทดสอบความล้าของคอนแขวนเคเบิลทั้งสามประเภทนี้ภายใต้น้ำหนักบรรทุกเป็นวัฏจักรจะกำหนดน้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำที่ค่า 0 ถึง 1,000 กิโลกรัม เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำของการทดสอบนี้มีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นจากสาเหตุของแรงลมที่กระทำต่อสายเคเบิล

การทดสอบคอนแขวนเคเบิลทั้งสามประเภท ได้แก่ คอนไม้แขวนเคเบิล คอนเหล็กรูปตัวซี และ คอนกรีตอัดแรงสปัน เมื่อทำการทดสอบน้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำของคอนแขวนเคเบิลทั้งสามประเภทนี้ความสัมพันธ์ของกราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความแอ่นตัวจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยที่จำนวนรอบการทดสอบเมื่อมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความแอ่นตัวเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ แม้ว่าระดับของน้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำจะมีค่าคงที่ในช่วง 0 ถึง 1,000 กิโลกรัม การเพิ่มขึ้นของค่าความแอ่นตัวเกิดจากผลของความล้าของคอนแขวนเคเบิลที่ทำการทดสอบ จากการทดสอบความล้าของคอนแขวนเคเบิลทั้งสามประเภทมีเพียงคอนไม้แขวนเคเบิลและคอนเหล็กรูปตัวซีที่ทำการทดสอบครบจำนวนการทดสอบสองล้านรอบโดยที่ตัวอย่างการทดสอบไม่เกิดความเสียหาย นอกจากคอนกรีตอัดแรงสปันที่ทำการทดสอบความล้าได้เพียงจำนวนรอบที่ 1,056,700 รอบ เนื่องจากคอนกรีตส่วนที่เป็นพื้นที่รับแรงดึงเกิดความเสียหายหลุดล่วงลงมาสามารถสังเกตเห็นเหล็กแรงดึงสูงและเหล็กปลอกที่อยู่ภายในคอนกรีตอัด

แรงสปัน โดยที่ความแอ่นตัวของคอนกรีตอัดแรงจะมีค่าสูงสุด 10.52 มิลลิเมตร เพราะความแกร่งเชิงดัดของคอนกรีตอัดแรงสปันมีค่าลดลงซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับคอนไม้แขวนเคเบิลและคอนเหล็กรูปตัวซีที่มีค่าความแอ่นตัวเท่ากับ 1.15 มิลลิเมตร และ 1.46 มิลลิเมตร ตามลำดับ หลังเสร็จสิ้นการทดสอบความล้าภายใต้น้ำหนักบรรทุกเป็นวัฏจักร

การทดสอบน้ำหนักบรรทุกสถิตย์ของคอนแขวนเคเบิลทั้งสามประเภทหลังเสร็จสิ้นการทดสอบความล้าภายใต้น้ำหนักบรรทุกเป็นวัฏจักร ผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสถิตย์ของคอนแขวนเคเบิลทั้งสามประเภทมีค่าดังนี้ คอนไม้แขวนเคเบิลมีค่าน้ำหนักบรรทุกขีดจำกัดสัดส่วนเท่ากับ 3,847 กิโลกรัม และน้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 6,000 กิโลกรัม คอนเหล็กรูปตัวซีมีค่าน้ำหนักบรรทุกดรากเท่ากับ 2,582 กิโลกรัม และน้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 3,919 กิโลกรัม และ คอนกรีตอัดแรงสปันมีค่าน้ำหนักบรรทุกดรากเท่ากับ 1,884 กิโลกรัม และน้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 2,451 กิโลกรัม ตามลำดับ ค่าน้ำหนักบรรทุกสถิตย์ที่ได้จากการทดสอบนี้เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกสถิตย์ของคอนแขวนเคเบิลจากการทดสอบ 30 ตัวอย่าง มีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นคอนเหล็กรูปตัวซีที่น้ำหนักบรรทุกดรากและน้ำหนักบรรทุกประลัยมีค่าลดลงเนื่องผลของความล้าโดยมีค่าน้ำหนักบรรทุกดรากและน้ำหนักบรรทุกประลัยลดลงเท่ากับ 18.4 เปอร์เซ็นต์ และ 11.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อย่างไรก็ตามน้ำหนักบรรทุกดรากของคอนเหล็กรูปตัวซีที่ทำการทดสอบหลังเสร็จสิ้นการทดสอบความล้ามีความสามารถในการรับน้ำหนักใช้งานเมื่อคำนึงถึงผลแรงฉุดที่กระทำผ่านสายเคเบิลแล้วแต่ในขณะที่คอนกรีตอัดแรงสปันแม้ว่าความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดดรากและน้ำหนักบรรทุกประลัยมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบน้ำหนักสถิตย์ 30 ตัวอย่าง แต่คอนกรีตอัดแรงสปันได้เกิดความเสียหายในส่วนพื้นที่รับแรงดึงก่อนจึงไม่เหมาะสมสำหรับในการนำไปรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย