

## บทที่ 1

### บทนำ

สำหรับบทนำเป็นการกล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย ขอบเขตของโครงการวิจัย และแนวทางที่จะนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในประเทศไทยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน มีการใช้คอนกรีตเป็นวัสดุในการก่อสร้างโครงสร้างหลายๆประเภท อาทิ ถนน สะพาน อาคารที่พักอาศัย เป็นต้น ทั้งนี้คอนกรีตอาจจะมีปัญหาการเสื่อมสภาพเนื่องจากความคงทนของคอนกรีตได้ เช่น การแตกร้าวขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก การเกิดสนิมของเหล็กเสริม การหลุดล่อนของปูนฉาบ เป็นต้น การเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะแวดล้อมดังกล่าวเป็นปัญหาที่สำคัญและพบเห็นได้ทั่วไปในปัจจุบัน เช่นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในเขตที่มีการจราจรหนาแน่น จะมีโอกาสสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ที่ความเข้มข้นเฉลี่ย 600 ถึง 650 ppm. หรือโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใกล้กับสิ่งแวดล้อมชายทะเลก็มีโอกาสสัมผัสกับไอเกลือจากทะเลได้เช่นกัน ซึ่งสภาวะดังกล่าวส่งผลกระทบต่อตัวโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ทำให้ตัวโครงสร้างคอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพ

ผู้ก่อสร้างและผู้ใช้งานโครงสร้างส่วนใหญ่ มักจะไม่ตระหนักต่อปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดขึ้น รวมทั้งไม่ค่อยมีการตรวจสอบประเมินโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาความคงทนที่พอจะมีการตรวจสอบอยู่บ้าง ก็เป็นการตรวจสอบโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น เขื่อน เป็นต้น ในขณะที่ยังไม่ค่อยมีการดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตแบบอื่นๆ ที่ใช้งานมาเป็นเวลานานแล้ว โดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตสาธารณะ เช่น สะพานลอย ที่มีสภาพทรุดโทรมยังใช้งานตามปกติ ซึ่งปัจจัยทั้งหลายเหล่านี้ล้วนส่งผลให้ความแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีตและอายุการใช้งานของโครงสร้างลดลงตามลำดับ จนอาจเกิดการพังทลายของโครงสร้างได้

พื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม จัดได้ว่าเป็นพื้นที่ที่มีการจราจรหนาแน่นในระดับหนึ่ง ทำให้มีปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง ซึ่งมีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเข้มข้นค่อนข้างมาก โดยส่งผลให้ความเป็นด่างของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอนเข้มข้นต่ำลงเนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ถูกใช้ในปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น จะทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ ถ้าคาร์บอนชั่นเกิดเข้าไปจนถึงตำแหน่งเหล็กเสริม โดยทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมลดต่ำลงจนใกล้หรือต่ำกว่าระดับวิกฤติ

เพื่อเป็นการรับมือกับปัญหาการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตสาธารณะต่างๆ เช่น สะพานลอย ในเขตพื้นที่ชุมชนจังหวัดนครปฐม งานวิจัยนี้จึงศึกษาปัญหาดังกล่าวข้างต้น เพื่อรวบรวมองค์ความรู้ที่เป็นตัวแปรสำคัญในการป้องกันปัญหาการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างสะพานลอยคอนกรีตเสริมเหล็กแต่ละพื้นที่ จากนั้นนำผลที่ได้มาประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุต่างกัน ตลอดจนศึกษาเปรียบเทียบมาตรฐานการออกแบบความคงทนของคอนกรีตสำหรับโครงสร้างที่เผชิญกับคาร์บอนเนชั่นกับการเกิดคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างที่ก่อสร้างจริง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อสำรวจเก็บข้อมูลของความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานลอยคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนที่ศึกษา

1.2.2 เพื่อศึกษารวบรวมองค์ความรู้เกี่ยวกับสถานะและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่ออัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างสะพานลอยคอนกรีตเสริมเหล็ก

1.2.3 เพื่อประเมินโอกาสที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นที่โครงสร้างอายุต่างกันของโครงสร้างสะพานลอยคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนที่ศึกษา

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ศึกษาารูปแบบของความเสียหายโครงสร้างสะพานลอยคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนที่ศึกษา

1.3.2 ทำการตรวจสอบพินิจ ตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างสะพานลอยคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนที่ศึกษา

1.3.3 ทำการวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ในโครงสร้างตัวอย่างที่ทำการทดสอบคาร์บอนเนชั่น

1.3.4 วิเคราะห์ตามหลักสถิติหาความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากระยะคาร์บอนเนชั่นกับอายุของโครงสร้าง

## 1.4 แนวทางที่จะนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1.4.1 ทำให้ทราบระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างสะพานลอยคอนกรีตเสริมเหล็กในแต่ละพื้นที่ ซึ่งสามารถนำข้อมูลไปวางแผนตลอดจนการบำรุงซ่อมแซมโครงสร้างได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

1.4.2 ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างสะพานลอยคอนกรีตเสริมเหล็กในแต่ละพื้นที่ต่างๆ

1.4.3 ได้มาซึ่งค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างสะพานลอย  
คอนกรีตเสริมเหล็กที่อายุต่างๆกัน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คอนกรีตที่ดีต้องมีกำลังตามต้องการและสามารถทนทานต่อสภาวะแวดล้อมตลอดอายุการใช้งานออกแบบ โดยยังสามารถคงรูปร่าง คุณภาพ คุณสมบัติ และการใช้งานได้ดีเช่นเดิม

#### 2.1 ปัญหาความคงทนของโครงสร้างคอนกรีต

การเสื่อมสภาพของคอนกรีตนั้นสามารถเกิดได้ในทุกช่วงอายุของคอนกรีต ตั้งแต่ในสภาวะพลาสติกไปจนถึงคอนกรีตในสภาวะแข็งตัวแล้ว ซึ่งลักษณะความเสี่ยงของการเสื่อมสภาพนั้นจะแตกต่างกันไปตามช่วงอายุ อย่างไรก็ตามการเสื่อมสภาพของคอนกรีตสามารถจำแนกได้เป็น 5 ประเภท ตามสาเหตุของการเสื่อมสภาพดังนี้ [1]

1. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกายภาพ
2. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางเคมี เช่น คาร์บอนेशन การกัดกร่อนโดยกรด การกัดกร่อนโดยซัลเฟต ปฏิกริยาระหว่างต่างกับมวลรวม
3. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกล เช่น การขีดสี การชะด้วยกระแสน้ำและกรวดทราย และการแตกตัวของฟองอากาศในน้ำ
4. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางชีวภาพ เช่น การเสื่อมสภาพโดยตะไคร่ รา รากพืช หรือแบคทีเรียบางชนิด
5. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุรวม เช่น การเกิดสนิมในเหล็ก เป็นต้น

ลักษณะของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างจะแตกต่างกันไปตามสภาวะแวดล้อมและปัจจัยอื่นๆที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องจากการเสื่อมสภาพในรูปแบบต่างๆกันจะมีลักษณะเฉพาะตัว ดังนั้นการวิเคราะห์หาสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพจึงทำได้จากการวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมสภาพ อย่างไรก็ตาม โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบางโครงสร้างอาจจะเสื่อมสภาพเนื่องจากสาเหตุหลักมากกว่าหนึ่งสาเหตุ หรืออาจได้รับความเสียหายจากการรับแรงที่มากเกินไป หรืองานก่อสร้างที่ไม่ได้คุณภาพ ซึ่งจะทำให้ความต้านทานการเสื่อมสภาพของโครงสร้างลดลงอย่างมาก

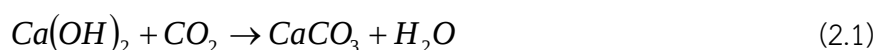
เนื่องจากลักษณะการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ค่อนข้างหลากหลาย ดังที่แสดงไว้ข้างต้น การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและการเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมและปัญหาทางด้านความคงทนที่มีความเสี่ยงสูงในแต่ละสภาวะจึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็น

## 2.2 ปัญหาการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น

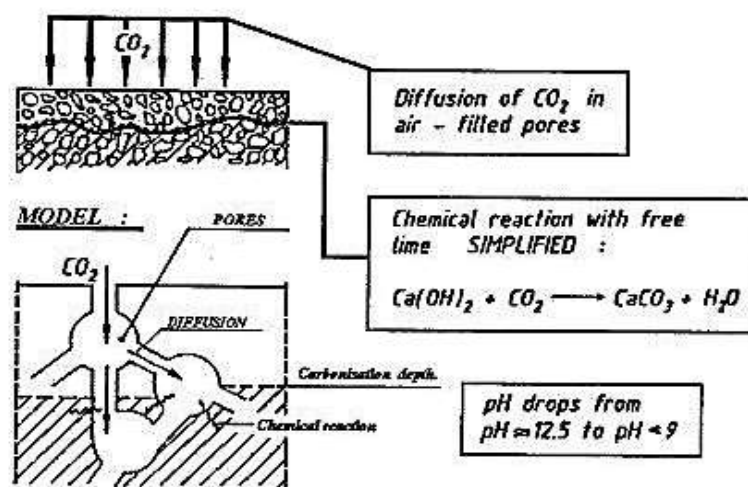
คาร์บอนเนชั่นเป็นขบวนการที่เปลี่ยนผลิตผลบางชนิดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งโดยปกติมักจะเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) และ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $\text{C-S-H}$ ) ให้เป็นผลิตภัณฑ์คาร์บอนเนต โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อต้องมีความชื้นและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

### 2.2.1 กลไกของการเกิดคาร์บอนเนชั่น

คาร์บอนเนชั่นเกิดจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) หรือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $\text{C-S-H}$ ) บริเวณผิวหน้าหรือใกล้ผิวหน้าของคอนกรีต ตามสมการ (2.1) ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้ [2]

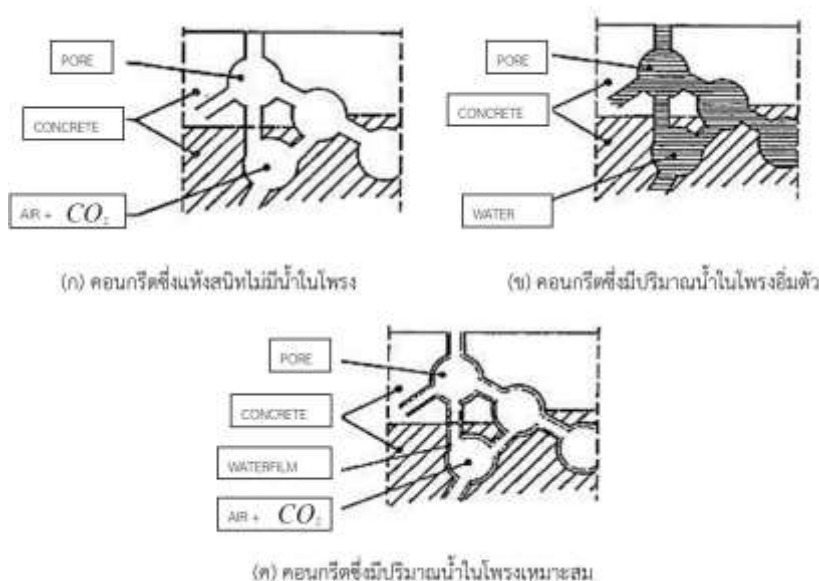


ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสภาพของสารละลายและคอนกรีตที่ถูกคาร์บอนเนตไปแล้วจะมีความพรุนน้อยลง เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอนเนตซึ่งเป็นผลิตผลจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นจะช่วยอุดช่องว่างส่วนหนึ่งในคอนกรีต ลักษณะของการทำปฏิกิริยาจะเกิดในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตที่มีโอกาสสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ในอากาศ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดีโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Pores) เข้าไปทำปฏิกิริยาในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ดังนั้นคาร์บอนเนชั่นจะค่อยๆ คืบหน้าเข้าไปในเนื้อคอนกรีตด้วยอัตราที่ช้าลงเรื่อยๆ เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะต้องแพร่ผ่านโครงสร้างช่องว่าง (Pore Structure) ของคอนกรีตและผ่านส่วนที่ถูกคาร์บอนเนตไปแล้วซึ่งจะมีความพรุนน้อยลง ทำให้ซึมผ่านเข้าไปได้ยากขึ้น



ภาพที่ 2.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นในคอนกรีต [3]

ปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นต้องการทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังนั้นในคอนกรีตที่อึดตัวด้วยน้ำหรือคอนกรีตที่แห้งสนิทจะไม่เกิดคาร์บอนชั่น เนื่องจากในคอนกรีตที่อึดตัวด้วยน้ำจะไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านเข้าไปได้มาก ส่วนในคอนกรีตที่แห้งสนิทไม่มีน้ำในการทำปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ดังนั้น คาร์บอนชั่นจะรุนแรงในกรณีที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอยู่ระหว่างกึ่งชื้นกึ่งแห้ง (Semi-Dry) นั่นคือ ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึงร้อยละ 60 และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศมาก



ภาพที่ 2.2 ภาพจำลองแสดงสถานะของความชื้นของโพรงในคอนกรีต [3]

การเกิดคาร์บอนชั้นโดยตัวของมันเองไม่ได้ทำให้คอนกรีตเสียหายแต่จะทำให้ความเป็นด่างของซีเมนต์เพสต์ลดลง ปกติซีเมนต์เพสต์มีความเป็นด่างสูงโดยมีค่า pH ระหว่าง 12.6 ถึง 13.5 และอาจลดลงเหลือเพียง 8 ถึง 9 ถ้าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในซีเมนต์เพสต์ทำปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นจนหมด

โดยทั่วไปเหล็กเสริมในคอนกรีตจะมีแผ่นฟิล์มบางที่ได้จากไฮดรตของซีเมนต์เพสต์เคลือบที่ผิว ซึ่งฟิล์มบางนี้จะป้องกันเหล็กไม่ให้เหล็กทำปฏิกิริยากับความชื้นและก๊าซออกซิเจน ดังนั้นเหล็กจึงไม่เป็นสนิมแต่คาร์บอนชั้นทำให้ความเป็นด่างหรือ pH ของคอนกรีตลดลงและฟิล์มบางที่เคลือบผิวเหล็กถูกทำลาย ทำให้ความชื้นและก๊าซออกซิเจนสามารถทำปฏิกิริยากับเหล็กสนิม เกิดสนิม เกิดการขยายตัว เบ่งคอนกรีต ทำให้เกิดแรงดึงขึ้น และดันคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมให้เกิดรอยร้าวหรือหลุดร่อนออกมาในที่สุด คาร์บอนชั้นเกิดจากผิวนอกของคอนกรีตเข้าสู่เนื้อข้างใน ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดคาร์บอนชั้น ได้แก่ ความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผิวคอนกรีต ความพรุนของเนื้อคอนกรีตซึ่งมีผลต่อการซึมเข้าสู่คอนกรีตของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือความแข็งแรงของคอนกรีต ตารางที่ 2.1 แสดงการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่เวลา 30 ปี โดยพิจารณาคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่างกัน ซึ่งพบว่าอัตราการเกิดคาร์บอนชั้นลดลงจาก 45 มม. เหลือเพียง 2 มม. เมื่อเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตจาก 20 เป็น 80 เมกะปาสกาล [4] นอกจากนี้ปริมาณความชื้นของคอนกรีตและความชื้นสัมพัทธ์ที่อยู่รอบคอนกรีตก็มีผลต่อการเกิดคาร์บอนชั้นเพราะคาร์บอนชั้นเกิดได้ยากเมื่อคอนกรีตแห้งมากหรือชื้นมาก [5]

ตารางที่ 2.1 การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่อยู่ภายนอกอาคาร [4]

| กำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน<br>(เมกะปาสกาล) | ความลึกของคาร์บอนชั้นที่เวลา 30 ปี<br>(มม.) |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 20                                            | 45                                          |
| 40                                            | 17                                          |
| 60                                            | 5                                           |
| 80                                            | 2                                           |

## 2.2.2 หลักการเลือกคอนกรีตที่อาจมีปัญหาคาร์บอนชั้น

คอนกรีตที่ทนต่อการเกิดคาร์บอนชั้นจะเป็นคอนกรีตที่มีเนื้อแน่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านเข้าไปได้ยาก ดังนั้นจึงควรเป็นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำและมีการบ่มที่ดี [6] ปัจจุบันการทำคอนกรีตนิยมใส่วัสดุปอซโซลานซึ่งมีผลต่อคาร์บอนชั้นด้วยเพราะวัสดุปอซโซลานจะลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำให้คาร์บอนชั้นเพิ่มขึ้นได้ แต่การใส่วัสดุปอซโซลานเมื่อมีการบ่มดีจะทำให้เนื้อซีเมนต์เพสต์แน่นขึ้นจึงสามารถช่วยลดคาร์บอนชั้นได้ ดังนั้นการใช้สารปอซโซลานเช่น เถ้าถ่านหินและตะกรันเตาถลุงเหล็กแม้ว่าจะทำให้คาร์บอนชั้นเพิ่มขึ้น [7] แต่การออกแบบส่วนผสมที่ดีและการบ่มที่ดีจะช่วยทำให้คาร์บอนชั้นเกิดในระดับที่ยอมรับได้ นอกจากนี้เมื่อคอนกรีตมี

อายุมากขึ้น ปฏิกริยาปอซโซลานจะช่วยทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ดีขึ้น โดยเฉพาะทำให้ความพรุนลดลงซึ่งช่วยลดการซึมผ่านและการเกิดคาร์บอนเนชั่นได้

### 2.2.3 ผลของคาร์บอนเนชั่น

คาร์บอนเนชั่นทำให้เกิดผลที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1. ทำให้ความพรุนของคอนกรีตบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชั่นต่ำลง
2. ทำให้ความแตกต่างของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชั่นต่ำลง เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ถูกใช้ไปในปฏิกริยาคาร์บอนเนชั่น ผลในประการแรกอาจจะเป็นผลดีต่อคอนกรีตในเรื่องของความคงทน แต่ผลประการหลังจะทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ ถ้าคาร์บอนเนชั่นเกิดเข้าไปจนถึงตำแหน่งเหล็กเสริมจนทำให้ความแตกต่างของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมลดต่ำลงจนใกล้หรือต่ำกว่าระดับวิกฤติ

3. ทำให้เกิดการหดตัว ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ภายใต้อิทธิพลของแรงอัด ที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้ง หรือจากการที่ทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $\text{C-S-H}$ ) เกิดเสียน้ำ (Dehydrate) ซึ่งส่งผลให้เกิดการหดตัว

ในผลของคาร์บอนเนชั่นทั้ง 3 ประการนี้ ประการที่ 2 คือกรณีที่ทำให้ความแตกต่างในคอนกรีตลดลงจะเป็นกรณีที่มีผลเสียต่อความคงทนของคอนกรีตมากที่สุด ส่วนในกรณีที่ 1 คือกรณีที่ให้ความพรุนของคอนกรีตลดลง จะเป็นกรณีที่เป็นผลดีต่อความคงทนของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ในกรณีของคอนกรีตเสริมเหล็ก คาร์บอนเนชั่นจะมีผลเสียมากกว่าผลดีที่ได้จากการลดความพรุน

### 2.2.4 การทดสอบคาร์บอนเนชั่น

การทดสอบคาร์บอนเนชั่นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การวิเคราะห์ทางเคมี การใช้ X-ray diffraction เป็นต้น แต่วิธีการที่ง่ายซึ่งแนะนำโดย RILEM [8] คือการใช้น้ำยาฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) ในแอลกอฮอล์ฉีดลงบนผิวคอนกรีตที่แตกออกใหม่ๆ ที่ต้องการวัดความลึกของคาร์บอนเนชั่น คอนกรีตที่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์อยู่จะปรากฏเป็นสีชมพู ส่วนคอนกรีตที่เกิดคาร์บอนเนชั่นจะไม่มีสี วิธีนี้สามารถบอกความลึกของคาร์บอนเนชั่นโดยซีเมนต์เพสต์มีค่าความเป็นด่างที่ค่า pH ประมาณ 9 นอกจากนี้ตามธรรมชาติคาร์บอนเนชั่นเกิดในคอนกรีตได้อย่างช้าๆ ดังนั้นจึงมักนิยมการทดสอบแบบเร่งโดยการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รอบคอนกรีตที่ต้องการทดสอบ ซึ่งความเข้มข้นที่นิยมใช้กันอยู่ในช่วงร้อยละ 4 ถึง 5 และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ถึง 60 ซึ่งเป็นความชื้นที่เกิดคาร์บอนเนชั่นได้มากที่สุด [11]

### 2.3 การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตสำหรับแต่ละปัญหาความคงทน

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น [2]

เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ต้องเผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะแพร่เข้าไปในคอนกรีต และทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นซึ่งจะทำให้ความสามารถของคอนกรีตในการปกป้องเหล็กเสริมจากการเป็นสนิมลดลงจนทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ ตัวอย่างของสภาพแวดล้อมที่มีคาร์บอนเนชั่น เช่น โครงสร้างในที่จอดรถ โครงสร้างริมถนนหรือใต้สะพาน บริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น โครงสร้างใต้สะพานที่เผชิญกับเขม่าควันต่างๆ ตลอดจนในอาคารที่มีผู้คนอยู่มาก เป็นต้น เพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตมีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นและมีอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซม (Repair-free service life) ตามที่กำหนด ต้องควบคุมให้ความลึกคาร์บอนเนชั่นในช่วงอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซมมีค่าไม่มากกว่าระยะหุ้มเหล็กเสริม โดยสามารถใช้สมการที่ (2.2) ในการออกแบบ

$$X_c \leq c \quad (2.2)$$

โดยที่

$c$  ระยะหุ้มเหล็กเสริม (มม.)

$X_c$  ความลึกคาร์บอนเนชั่น (มม.) วัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.3)

$$X_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \cdot \sqrt{t} \quad (2.3)$$

โดยที่

$\alpha_1$  สัมประสิทธิ์การสัมผัสความเปียกชื้น ในที่นี้กำหนดให้

มีค่าเท่ากับ 1.00 สำหรับผิวคอนกรีตที่ไม่สัมผัสความเปียกชื้นในขณะใช้งาน เช่น ผิวคอนกรีตที่อยู่ในร่มภายในอาคาร เป็นต้น

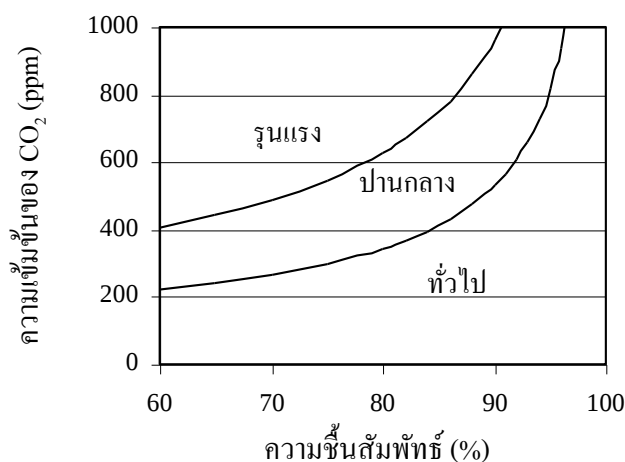
และมีค่าเท่ากับ 0.95 สำหรับผิวคอนกรีตที่สัมผัสความเปียกชื้นในขณะใช้งาน เช่น ผิวคอนกรีตที่อยู่กลางแจ้งสามารถสัมผัสกับฝนได้ เป็นต้น

$\alpha_2$  สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น สามารถกำหนดได้จากตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น [2]

| ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม      | $\alpha_2$ |
|-------------------------------|------------|
| สภาวะทั่วไป                   | 0.65       |
| เสี่ยงต่อคาร์บอนเนชั่นปานกลาง | 0.85       |
| เสี่ยงต่อคาร์บอนเนชั่นรุนแรง  | 1.00       |

ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น สามารถกำหนดได้โดยใช้ภาพที่ 2.3 โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของบริเวณสถานที่ที่จะทำการก่อสร้างในช่วงอายุการใช้งาน ซึ่งอาจต้องคาดการณ์ล่วงหน้าไปในอนาคต

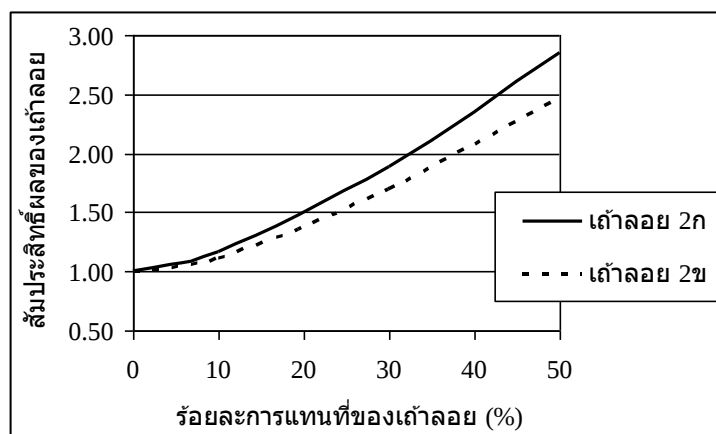


ภาพที่ 2.3 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนขึ้น [2]

สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนขึ้น ( $k$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.4)

$$k = 17.5 \cdot k_r \cdot (w/b)^3 \quad (2.4)$$

ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่แก๊สในวัสดุประสาน ( $k_r$ ) สามารถกำหนดได้โดยใช้ภาพที่ 2.4 (ชนิดของแก๊ส 2ก และ 2ข กำหนดตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 หรือ ว.ส.ท. 1014-46)



ภาพที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่แก๊สในวัสดุประสาน [2]

### ข้อแนะนำ

- (1) สมการการออกแบบความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนขึ้นชุดนี้ สามารถใช้ในกรณีของคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าวและคอนกรีตควมมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานไม่เกิน 0.65 และมีการแทนที่แก๊สในวัสดุประสานไม่เกินร้อยละ 50
- (2) ในกรณีของคอนกรีตที่มีรอยร้าว ผลของการมีรอยร้าวจะทำให้อายุการใช้งานที่ปลอดภัยของคอนกรีตลดลง ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนขึ้น ( $k$ ) ในสมการที่ (4) ไม่ได้คำนึงถึงผลของรอยแตกร้าว หากต้องการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่มีรอยร้าว หรือใช้คอนกรีตที่มี

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเกิน 0.65 หรือมีการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสานเกินกว่าร้อยละ 50 ควรปรึกษาผู้เชี่ยวชาญพิเศษ

## 2.4 การทดสอบแบบไม่ทำลาย [2]

การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive Tests) เป็นการทดสอบเพื่อตรวจวัดคุณสมบัติของคอนกรีตหรือเพื่อตรวจสอบสภาพของโครงสร้างคอนกรีต โดยที่ไม่ทำให้คอนกรีตได้รับความเสียหายหรือเกิดความเสียหายน้อยที่สุด การทดสอบแบบไม่ทำลายที่ดีจะใช้เครื่องมือทางเทคนิคและการควบคุมรายละเอียดของการทดสอบให้เป็นไปตามกำหนด โดยแบ่งการทดสอบดังต่อไปนี้

1. การทดสอบหาค่ากำลังของคอนกรีตในสนามด้วยค้อนกระแทก (Schmidt Hammer)
2. การตรวจหาตำแหน่งของเหล็กเสริมและวัดระยะหุ้มเหล็กด้วยเครื่องวัดระยะหุ้มเหล็ก (Covermeter)

### 2.4.1 การทดสอบกำลังของคอนกรีตในสนามด้วยค้อนกระแทก (Rebound Hammer)

ค้อนกระแทก (Rebound Hammer) เป็นเครื่องมือรูปทรงกระบอกภายในประกอบด้วยสปริงแรงในแนวแกน ตั้มน้ำหนัก และแท่งเหล็ก ประกอบอยู่ในโครงรูปแบบ ดันค้อนเข้าหาพื้นผิวของคอนกรีตซึ่งแท่งเหล็กจะถูกดันร่นเข้ามาอัดสปริง เมื่อแท่งเหล็กถูกดันเข้ามาเต็มที่ สปริงจะคืนตัวโดยอัตโนมัติ และแท่งเหล็กจะถูกดันขับเข้ากับค้อนส่งแรงกระแทกเข้ากับคอนกรีต และสะท้อนกลับออกมา ระยะของการสะท้อนกลับแสดงโดยตัวชี้บนสเกลซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 100 ซึ่งเรียกว่าค่าการสะท้อน (R) ซึ่งมีค่าขึ้นกับความแข็งแรงของคอนกรีต ถ้าคอนกรีตแข็งแรงมาก ระยะสะท้อนกลับจะมีค่ามาก การตีความของค่า R จะแสดงไว้ในคู่มือการใช้งานที่ผู้ผลิตแต่ละรายจะเป็นผู้ให้มา ซึ่งค่า R จะเพิ่มขึ้นตามกำลังของคอนกรีต ตัวเลขที่วัดได้อาจใช้เพื่อประมาณความเป็นเนื้อเดียวกันของคอนกรีตและคุณภาพของคอนกรีต

#### ขั้นตอนการทดสอบ

ในการทดสอบให้ใช้ค้อนกระแทกที่ผลิตโดยบริษัทที่มีความเป็นมาตรฐาน ทำการกำหนดตำแหน่งที่จะทำการวัดค่าการสะท้อน โดยควรเป็นบริเวณผิวคอนกรีตที่เรียบไม่มีรอยแตกร้าวหรือการกะเทาะออกของผิวคอนกรีต หากผิวไม่เรียบให้ทำการขัดผิวคอนกรีตให้เรียบด้วยก้อนหินขัดการทดสอบหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ตำแหน่งหนึ่งๆ ให้ทำการวัดค่าการทดสอบบริเวณตำแหน่งที่ต้องการทราบค่ากำลังอัดอย่างน้อย 10 ครั้ง โดยจุดที่วัดค่าการสะท้อนแต่ละครั้งต้องห่างกันประมาณ 25 มม. ในการทดสอบ 1 ตำแหน่งสามารถทดสอบได้ทั้งทิศแนวนอน แนวตั้ง (ทิศทางลงหรือทิศทางขึ้น) หรือ แนวเฉียง ซึ่งทิศทางการทดสอบก็เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตด้วย

ในส่วนของค่าการสะท้อนของ Schmidt Hammer สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยอ้างอิงการประมาณค่าตามความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 2.5 (Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 2005) หรือ สมการที่ 2.6 [9, 35]

$$f'_c = -18 + (1.27 \times RN) \quad (2.5)$$

โดยที่  $f'_c$  คือค่าประมาณการกำลังอัดของคอนกรีต ( $\text{N/mm}^2$ )

RN คือค่าการสะท้อนของ Schmidt Hammer

$$f'_c = -176.4 + (12.446 \times RN) \quad (2.6)$$

โดยที่  $f'_c$  คือค่าประมาณการกำลังอัดของคอนกรีต (กก.ต่อซม.<sup>2</sup>)

RN คือค่าการสะท้อนของ Schmidt Hammer

#### 2.4.2 การตรวจหาตำแหน่งของเหล็กเสริมและวัดระยะหุ้มเหล็กด้วยเครื่องวัดระยะหุ้มเหล็ก

เครื่องวัดระยะหุ้มเหล็ก เป็นอุปกรณ์สำรวจที่ใช้ในการตรวจสอบตำแหน่งของเหล็กเสริมในคอนกรีต ใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจากอุปกรณ์สำรวจนั้น ๆ เมื่อเคลื่อนอุปกรณ์เข้าใกล้เหล็กเสริมในคอนกรีต เครื่องวัดจะบ่งบอกตำแหน่งของเหล็กเส้น เมื่ออุปกรณ์สำรวจอยู่เหนือเหล็กเส้นพอดี เมื่อมีการปรับเทียบที่เหมาะสม อุปกรณ์นี้ก็จะใช้คาดคะเนระยะหุ้มเหล็กได้หากรู้ขนาดของเหล็กเส้น หรืออาจใช้คาดคะเนขนาดเหล็กเส้นได้หากรู้ระยะหุ้มเหล็ก

##### ขั้นตอนการทดสอบ

ให้ใช้เครื่องวัดระยะหุ้มเหล็กที่ผลิตโดยบริษัทที่มีมาตรฐาน และก่อนนำเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กไปใช้ ให้สอบเทียบเครื่องมือในห้องทดสอบเพื่อยืนยันความแม่นยำของเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กโดยความถี่ของการตรวจสอบขึ้นอยู่กับคำแนะนำของผู้ผลิตเครื่องมือและควรบันทึกประวัติการตรวจสอบไว้ด้วย โดยดำเนินการตรวจวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กได้ต่อเมื่อการแสดงผลของเครื่องนิ่งเท่านั้นเมื่ออุปกรณ์อยู่ในสภาพพร้อมทำงาน ให้นำหัววัดแนบกับผิวคอนกรีตและเคลื่อนที่บนผิวคอนกรีตในทิศทางที่ต้องการวัด ทิศทางการเคลื่อนหัววัดควรตั้งฉากกับแนวการวางตัวของเหล็กเสริม เนื่องจากเหล็กเสริมมีผลต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากที่สุดเมื่อวางตัวผ่านแกนของขดลวดในหัววัด โดยเครื่องวัดระยะหุ้มเหล็กจะส่งสัญญาณให้ผู้ดำเนินการวัดทราบเมื่อผ่านตำแหน่งที่มีเหล็กเสริมอยู่

#### 2.5 การวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ

เครื่องวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่ใช้ในการตรวจสอบครั้งนี้เป็นยี่ห้อ Extech รุ่น CO 250 โดยการใช้สัญญาณตัวเซ็นเซอร์บริเวณส่วนหัวของเครื่องในการตรวจรับค่าที่เกิดขึ้น เมื่อต้องการทำการวัดค่าที่บริเวณใดให้ทำการเปิดเครื่องที่บริเวณนั้น เครื่องจะทำการบู้ตเป็นเวลา 30 วินาทีหลังจากนั้นก็จะแสดงค่าที่หน้าปัดของตัวเครื่อง ซึ่งมีทั้งหมด 3 ค่าคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ

#### 2.6. การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการเกิดคาร์บอนเนชั่น หากกระบวนการเกิดปฏิกิริยาผ่านไปนานขึ้นเรื่อยๆระยะคาร์บอนเนชั่นจะค่อยๆลึกเข้าไปในคอนกรีต ทำลายฟิล์มบางๆที่เคลือบอยู่บนผิวเหล็กเสริมที่มีหน้าที่ป้องกันการถูกทำลาย ทำให้เหล็กเสริมถูกทำลายและผุกร่อน จนเป็นเหตุให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดความเสียหายตามลำดับ

##### อิทธิพลหรือปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่น

การผลิตปูนซีเมนต์ที่ผ่านกระบวนการเผาจะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน แต่การผลิต

และใช้ปูนซีเมนต์ก็ยังคงมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งการแก้ปัญหาที่สามารถทำได้ก็คือการใช้วัสดุทดแทน นั่นก็คือ วัสดุปอซโซลาน แต่อย่างไรวัสดุดังกล่าวก็อาจเกิดผลกระทบต่อการเกิดคาร์บอนขึ้นในคอนกรีตได้ [12,13] แต่อย่างไรก็ตามวัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ก็มีส่วนในการต้านทานการเกิดคาร์บอนขึ้นได้แตกต่างกัน [11,14,15,16] รวมถึงสภาวะปัจจัยอื่นๆด้วย เช่น

### (1) อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

Fattuhi [17] ได้ทำการศึกษาเรื่อง *Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period* มีการหล่อคอนกรีตตัวอย่างทดสอบแบบแรงในหึ่งปฏิบัติการ โดยอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้ 0.7, 0.6 และ 0.4 ทำการทดสอบการเกิดคาร์บอนขึ้นที่ 1, 3, 7, 21 และ 28 วัน พบว่าอัตราการเกิดคาร์บอนขึ้นจะมีมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงขึ้น

Jin-Keun Kim et al. [18] ได้ทำการศึกษาเรื่อง *Effect of carbonation on the rebound number and compressive strength of concrete* มีการหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่มีความแข็งแรงสูง, กลาง และต่ำ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.68, 0.46 และ 0.28 ตามลำดับ ทดสอบการเกิดคาร์บอนขึ้นในสภาวะแรงในหึ่งปฏิบัติการ ที่อายุ 1, 2, 3 และ 4 เดือน และวัดค่ากำลังอัด พบว่าที่อายุมากขึ้นการเกิดคาร์บอนขึ้นก็ยิ่งมากขึ้นด้วย และคอนกรีตที่มีกำลังต่ำจะมีอัตราการพัฒนาระยะคาร์บอนขึ้นได้สูงกว่าคอนกรีตที่มีกำลังสูง

J.Banjongrat et al. [19] ทำการศึกษาเรื่อง *Effect of plastering mortar and paint On carbonation resistance of concrete* มีการหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4, 0.5 และ 0.6 โดยตัวอย่างคอนกรีตมีทั้งการทาสี ไม่ทาสี ฉาบปูนและไม่ฉาบปูน ทำการทดสอบอัตราการเกิดคาร์บอนขึ้นโดยการผ่าซีกตัวอย่างคอนกรีตแล้วฉีดด้วยสารละลายฟีนอล์ฟธาไลน์ พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนขึ้นสูงขึ้น สำหรับผลของสีและปูนฉาบสามารถป้องกันการเกิดคาร์บอนขึ้นได้ในระดับหนึ่ง

H.A1-Khayat et al. [20] ได้ทำการศึกษาเรื่อง *Concrete carbonation in arid climate* มีการหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ดังนี้ 0.45-0.80 ทดสอบการเกิดคาร์บอนขึ้นในสภาพแวดล้อมจริง พบว่าอัตราการเกิดระยะคาร์บอนขึ้นจะมีมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงขึ้น และในส่วนของกำลังอัดพบว่าระยะคาร์บอนขึ้นมีค่าผกผันกับค่ากำลังอัด

## (2) อิทธิพลของชนิดและปริมาณวัสดุประสาน

Cengiz Duran Atis [21] ได้ทำการศึกษาเรื่อง *Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash* มีการหล่อตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอย ทดสอบในสภาวะเร่งในห้องปฏิบัติการที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 65 และ 100 % ทำการทดสอบหาระยะคาร์บอนเนชันและค่ากำลังอัดที่ 3,7,28 และ 90 วัน พบว่าการแทนที่เถ้าลอยในคอนกรีตที่ปริมาณมากทำให้การเกิดคาร์บอนเนชันสูงกว่าการแทนที่เถ้าลอยในคอนกรีตที่ปริมาณน้อยและในส่วนของกำลังอัดพบว่าระยะคาร์บอนเนชันมีค่าผกผันกับค่ากำลังอัด

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และคณะ [22] ทำการศึกษาเรื่อง *ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว* มีการศึกษาการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบดำร้อยละ 20 และ 40 โดยอัตราส่วนปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.2, 1.4 และ 1.6 ในขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6, 0.7 และ 0.8 ตามลำดับ พบว่าระยะคาร์บอนเนชันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่เถ้าแกลบดำในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ในส่วนของการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีค่าต่างกันพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานยิ่งมากขึ้นจะทำให้ระยะคาร์บอนเนชันมากขึ้นตามไปด้วย

J.Khunthongkeaw et al. [23] ได้ทำการศึกษาเรื่อง *A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete* มีการใช้เถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของปริมาณ CaO ที่ต่างกันสำหรับการหล่อคอนกรีตทดสอบ โดยนำตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยไปทดสอบในสภาวะเร่งและสภาวะแวดล้อมจริงต่าง ๆ กันคือในเขตเมือง ชนบท และชายทะเล พบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO สูงจะมีการเกิดคาร์บอนเนชันต่ำกว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO ต่ำ ส่วนการเกิดคาร์บอนเนชันของสภาวะแวดล้อมในเมืองสูงกว่าสภาวะแวดล้อมอื่นๆ นอกจากนี้พบว่าการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ก็ทำให้การเกิดคาร์บอนเนชันได้เร็วกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าลอย

S.K.Roy et al. [24] ทำการศึกษาเรื่อง *Effect of plastering on the carbonation of a 19-year-old reinforced concrete building* มีการศึกษาถึงผลกระทบของความหนาปูนฉาบที่มีต่อการเกิดคาร์บอนเนชัน ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอายุ 19 ปี โดยการเจาะเก็บตัวอย่างโครงสร้างเสาและคาน ทดสอบระยะคาร์บอนเนชันด้วยการใช้สารละลายฟีนอล์ฟธาไลน มีการนำข้อมูลแสดงผลด้วยกราฟแท่ง ดูการกระจายตัวของข้อมูล เป็นต้น ซึ่งพบว่าโครงสร้างที่มีปูนฉาบมีแนวโน้มระยะคาร์บอนเนชันน้อยกว่าโครงสร้างที่ไม่มีปูนฉาบ

## (3) อิทธิพลของกำลังและความพรุน

เมื่อระยะคาร์บอนเนชันมีค่าลดลง กำลังอัดประลัยมีค่าเพิ่มขึ้น [12,25] ซึ่งกำลังอัดจะแปรผันโดยตรงกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) นอกจากนั้นยังมีปัจจัยของความพรุนของคอนกรีตซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เช่นกัน เมื่อคอนกรีตมีความพรุนน้อย นั้นอาจหมายความว่าคอนกรีตมีความทึบแน่นดี ส่งผลให้กำลังอัดสูงและลดการซึมผ่าน [25,26,27]

Khan & Lynsdale [25] ได้ใช้วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุประสานรวมกันสองและสามชนิด ซึ่งประกอบด้วยเถ้าลอยและซิลิกาฟูม โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.27 ความชื้นเหลวเท่ากับ  $125 \pm 10$  มิลลิเมตร (ค่าการยุบตัว) ควบคุมโดยใช้สารลดน้ำพิเศษ พบว่า การใช้ซิลิกาฟูมให้กำลังอัดที่อายุต้นสูง การใช้ซิลิกาฟูมในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสานร่วมกับเถ้าลอยทุกสัดส่วนผสมสามารถลดการซึมผ่าน นอกจากนั้นการใช้ซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสมทำให้ความลึกคาร์บอนเพิ่มขึ้นเพื่อเทียบกับคอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ในส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยก็มีส่วนทำให้ความลึกคาร์บอนเพิ่มขึ้นเช่นกันเมื่อการแทนที่ของเถ้าลอยเพิ่มขึ้น

#### (4) อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์

S.K. Roy et al. [28] ได้ทำการศึกษาเรื่อง *Durability of concrete -accelerated carbonation and weathering studies* มีการนำตัวอย่างคอนกรีตทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น โดยศึกษาปัจจัยด้านระดับความชื้นสัมพัทธ์ คุณภาพคอนกรีตที่มีตั้งแต่เกรด 20, 25, 30, 35 และ 40 ที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่น ซึ่งพบว่าคุณภาพคอนกรีตทุกเกรดจะมีแนวโน้มการเกิดคาร์บอนเนชั่นที่สูงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าอยู่ระหว่าง 52-75 %

#### (5) อิทธิพลของสภาวะแวดล้อม

J.Khunthongkeaw et al. [23] ได้ทำการศึกษาเรื่อง *A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete* มีการใช้เถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของปริมาณ CaO ที่ต่างกันสำหรับการหล่อคอนกรีตทดสอบ โดยนำตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยไปทดสอบในสภาวะแรงและสภาวะแวดล้อมจริงต่าง ๆ กันคือในเขตเมือง ชนบท และชายทะเล พบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO สูงจะมีการเกิดคาร์บอนเนชั่นต่ำกว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO ต่ำ ส่วนการเกิดคาร์บอนเนชั่นของสภาวะแวดล้อมในเมืองสูงกว่าสภาวะแวดล้อมอื่นๆ นอกจากนี้พบว่า การแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ก็ทำให้การเกิดคาร์บอนเนชั่นได้เร็วกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าลอย

M.N.Haque et al. [29] ได้ทำการศึกษาเรื่อง *Climatic zone-A prelude to designing durable concrete structures in the Arabian Gulf* มีการศึกษาถึงความคงทนของโครงสร้างที่มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ในบริเวณทะเลอ่าวเปอร์เซีย ด้วยการศึกษาถึงการเสื่อมสภาพเนื่องจาก คลอไรด์ ซัลเฟต และคาร์บอนเนชั่น สำหรับในส่วนคาร์บอนเนชั่นพบว่าอาคารที่ใกล้กับทะเลมีแนวโน้มการเกิดคาร์บอนเนชั่นสูงกว่าตำแหน่งที่ของอาคารที่ไกลจากทะเล

Castro et al. [30] ได้ทำการศึกษาเรื่อง *Influence of marine micro-climates on carbonation of reinforced concrete buildings* มีการศึกษาถึงปัจจัยด้านสภาวะสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยการเก็บเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ระดับความสูง 50, 125 และ 190 เซนติเมตร ของตัวอาคาร จากนั้นนำไปทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาตำแหน่งที่ตั้งของอาคารที่อยู่ใกล้สภาวะแวดล้อมทะเลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นด้วย พบว่าตำแหน่งที่ตั้งอาคารห่างจากทะเลประมาณ 100-200 ม.มีแนวโน้มอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ และระดับความสูงเพิ่มขึ้นของอาคารตัวอย่าง ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นสูงขึ้นด้วย

Alexander et al. [31] ได้ทำการศึกษาเรื่อง *Carbonation of concrete bridge structures in three South African localities* มีการทดสอบอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างสะพาน 3 แห่งในแอฟริกาใต้ที่มีอายุระหว่าง 11-76 ปี คือสะพานที่อยู่ในพื้นที่ Cape Peninsula, Durban และ Johannesburg ซึ่งการเกิดคาร์บอนเนชั่นขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง สภาพแวดล้อมที่ตั้งของโครงสร้างสะพาน โดยสภาพแวดล้อมที่ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 51-68 เปอร์เซ็นต์ จะมีโอกาสที่การเกิดคาร์บอนเนชั่นมากกว่าสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ที่ประมาณมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์

Haque et al. [32] ได้ทำการศึกษาเรื่อง *Carbonation of concrete structures in hot Dry coastal Regions* ซึ่งมีการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่นของอาคารที่มีตำแหน่งที่ตั้งใกล้กับทะเล มีการเก็บตัวอย่างคอนกรีตของโครงสร้างผนังและเสาทดสอบอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่น รวมถึงการวัดค่ากำลังอัดของโครงสร้าง พบว่าอาคารที่มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ห่างจากทะเลเป็นระยะทางที่ไม่มาก (ระหว่าง 0.5-2 กม.) มีอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นสูงกว่าอาคารที่มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ห่างจากทะเลเป็นระยะทางที่มากกว่า (ระหว่าง 3-20 กม.) ในส่วนของกำลังอัดพบว่าระยะคาร์บอนเนชั่นมีค่าผกผันกับค่ากำลังอัด

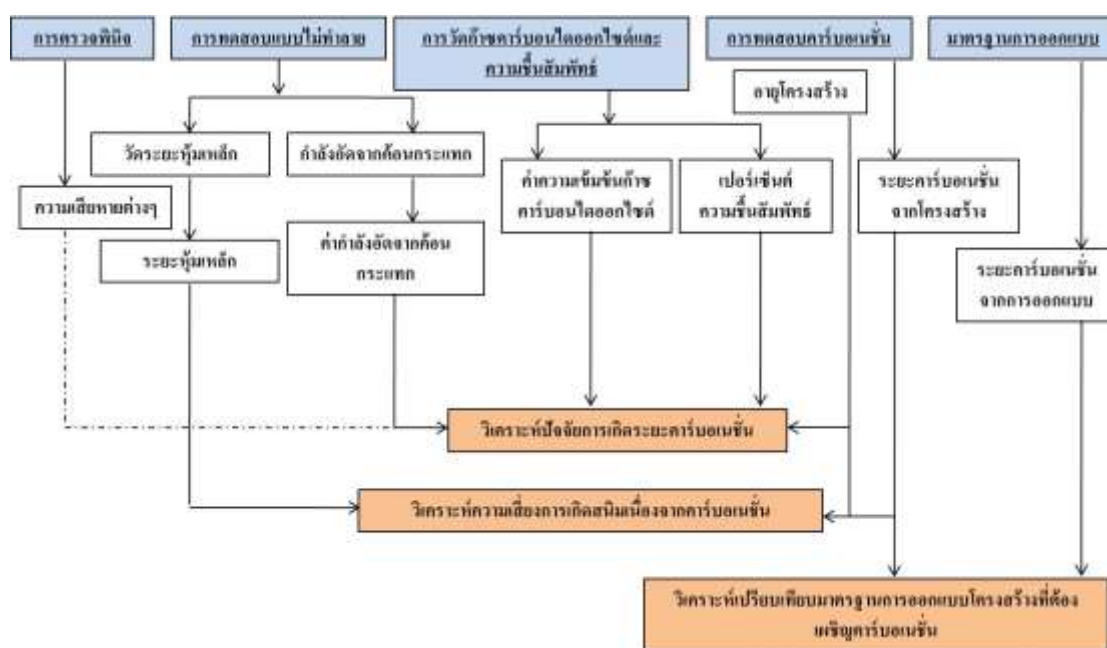
วัจนวงศ์ กริพละและคณะ [33] ทำการศึกษาเรื่อง *การสำรวจ ทดสอบและประเมินสภาพโครงสร้างเสา โครงการทางรถไฟยกระดับ* มีการเจาะเก็บตัวอย่างชิ้นส่วนเสาและคานของโครงสร้างทางด่วนสายเหนือจากสถานีรถไฟหัวลำโพงถึงท่าอากาศยานนานาชาติดอนเมือง สายตะวันออก และสายตะวันตกด้วยวิธีการ coring ที่ระดับความสูงประมาณ 1 ม.จากระดับพื้นดิน เพื่อทดสอบหาค่าระยะคาร์บอนเนชั่น พบว่ามีระยะคาร์บอนเนชั่นอยู่ระหว่าง 2.00-19.40 มม. มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 10.90 มม. มีอายุการใช้งานเฉลี่ยที่เหลืออยู่ 65 ปี

จากงานวิจัยในอดีตที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าเป็นการศึกษาการเกิดคาร์บอนชั้นของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างจริงในสภาวะแวดล้อมต่างกัน ซึ่งอาจจะเห็นผลการทดลองที่ชัดเจนในระดับหนึ่ง โดยโครงสร้างดังกล่าวที่ตรวจสอบจะเน้นไปที่โครงสร้างมูลฐานขนาดใหญ่ เช่น สะพาน ทางด่วน เป็นต้น นอกจากนั้นก็ยังเป็นการทดสอบแบบเร่งในห้องปฏิบัติการเป็นส่วนใหญ่ ในการทดลองวิจัยครั้งนี้เล็งเห็นว่าการศึกษาการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมจริง อำเภอเมืองนครปฐม ซึ่งในปัจจุบันมีฐานข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมจริงบริเวณดังกล่าวค่อนข้างน้อย ตลอดจนการเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมของถ้ำลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและฝุ่นหินปูนเพื่อใช้ในคอนกรีตที่สัมผัสสิ่งแวดล้อมคาร์บอนไดออกไซด์ ยังให้ความสำคัญในเรื่องดังกล่าวค่อนข้างน้อย โดยปัญหาดังกล่าวมีความสำคัญต่อปัญหาความคงทนเกี่ยวกับคาร์บอนชั้นที่จะเกิดขึ้นกับโครงสร้างในอำเภอเมืองนครปฐมได้

### บทที่ 3

#### ระเบียบวิธีการวิจัย

ในการศึกษาการประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากคาร์บอนขึ้น : กรณีศึกษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดนครปฐมครั้งนี้ ประกอบด้วยการตรวจสอบด้วยตาเปล่า ร่วมกับการใช้อุปกรณ์ตรวจสอบพื้นฐาน เช่น ไม้บรรทัด มาตรการวัดความกว้างของรอยร้าว เป็นต้น พร้อมกับการทดสอบแบบไม่ทำลายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก การวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ และเจาะเก็บตัวอย่างโครงสร้าง สะพานลอยคอนกรีตเสริมเหล็กทดสอบทางเคมีในห้องปฏิบัติการ โดยระเบียบวิธีการของการ ตรวจสอบแต่ละประเภทสามารถจำแนกได้ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนภาพการตรวจสอบการเสื่อมสภาพสะพานลอยคอนกรีตเสริมเหล็ก

#### 3.1 ศึกษาสถานที่ตั้ง

สถานที่ตั้งของสะพานลอยในสิ่งแวดล้อมที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับสูง โครงสร้างสะพานลอยที่ศึกษาอยู่ในพื้นที่จังหวัดนครปฐม โดยทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตของโครงสร้างสะพานลอยที่มีการจราจรหนาแน่น เป็นแหล่งชุมชน พร้อมกับการเก็บบันทึกข้อมูลทั่วไปของโครงสร้างสะพานลอยไปพร้อมกัน เช่น อายุของโครงสร้าง ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ กำลังอัดของโครงสร้าง ความสูงของตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง เป็นต้น

จากสภาพการใช้งานของโครงสร้างสะพานลอยที่อยู่ในจังหวัดนครปฐม ซึ่งเป็นเขตปริมณฑล สภาพความเสียหายต่างๆก็มีให้เห็นบ้าง การสำรวจความเสียหายของโครงสร้างสะพานลอยเบื้องต้นจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นมากพอสมควร เพื่อจะนำไปสู่การตรวจสอบเชิงลึกต่อไป

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างสะพานลอยที่คัดเลือกมา มีคุณสมบัติที่มีผลต่อความคงทนของคอนกรีต อาทิ

1) ตำแหน่งที่ตั้งของโครงการ ซึ่งมีสภาพแวดล้อมที่ต่างกันคือ พื้นที่เขตอำเภอเมือง, พื้นที่อำเภอกำแพงแสนและพื้นที่อำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม

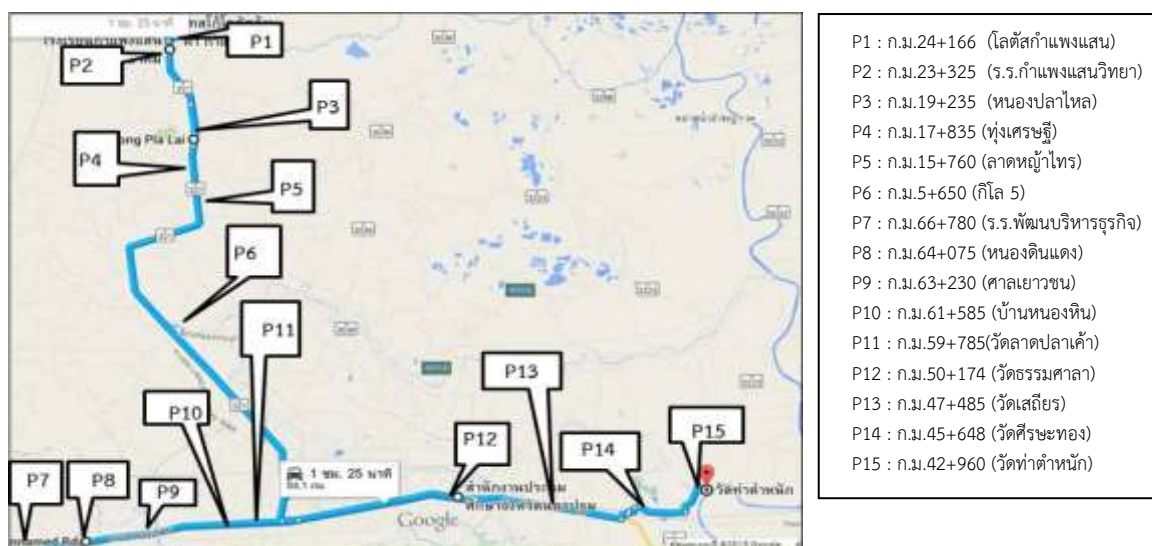
2) อายุของโครงสร้าง ที่มีตั้งแต่อายุ 12 ปี จนถึง 22 ปี (นับจากวันที่ก่อสร้างแล้วเสร็จ)

ตารางที่ 3.1 รายชื่อตัวอย่างโครงสร้างอาคารที่ดำเนินการตรวจสอบ

|                                     | แล้วเสร็จ<br>(พ.ศ.) | อายุ<br>โครงสร้าง* | ตำแหน่งที่ตั้ง |              |
|-------------------------------------|---------------------|--------------------|----------------|--------------|
|                                     |                     |                    | ละติจูด (N)    | ลองจิจูด (E) |
| <b><u>พื้นที่อำเภอกำแพงแสน</u></b>  |                     |                    |                |              |
| ก.ม.24+166 (โลตัสกำแพงแสน)          | 2542                | 15                 | 13°59'34"      | 99°59'43"    |
| ก.ม.23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา)      | 2542                | 15                 | 13°59'07"      | 99°59'41"    |
| ก.ม.19+235 (หนองปลาไหล)             | 2542                | 15                 | 13°57'03"      | 100°00'14"   |
| ก.ม.17+835 (ทุ่งเศรษฐี)             | 2542                | 15                 | 13°56'17"      | 100°00'13"   |
| ก.ม.15+760 (ลาดหญ้าไทร)             | 2542                | 15                 | 13°54'36"      | 99°58'50"    |
| <b><u>พื้นที่อำเภอเมือง</u></b>     |                     |                    |                |              |
| ก.ม.5+650 (กิโล 5)                  | 2542                | 15                 | 13°51'25"      | 100°00'47"   |
| ก.ม.66+780 (ร.ร.พัฒนบริหารธุรกิจ)   | 2543                | 15                 | 13°47'48"      | 99°57'55"    |
| ก.ม.64+075 (หนองดินแดง)             | 2542                | 16                 | 13°47'58"      | 99°59'21"    |
| ก.ม.63+230 (ศาลยาวชน)               | 2544                | 14                 | 13°48'06"      | 99°59'49"    |
| ก.ม.61+585 (บ้านหนองหิน)            | 2546                | 12                 | 13°48'11"      | 100°00'43"   |
| ก.ม.59+785 (วัดลาดปลาเค้า)          | 2546                | 12                 | 13°48'14"      | 100°01'43"   |
| ก.ม.50+174 (วัดธรรมศาลา)            | 2541                | 17                 | 13°48'46"      | 100°06'59"   |
| <b><u>พื้นที่อำเภอนครชัยศรี</u></b> |                     |                    |                |              |
| ก.ม.47+485 (วัดเสถียร)              | 2543                | 14                 | 13°48'31"      | 100°08'27"   |
| ก.ม.45+648 (วัดศิระทอง)             | 2541                | 17                 | 13°48'23"      | 100°09'13"   |
| ก.ม.42+960 (วัดท่าตำหนัก)           | 2535                | 22                 | 13°47'17"      | 100°10'20"   |

\*อายุโครงสร้างนับจากวันที่ก่อสร้างเสร็จไปจนถึงวันที่ตรวจสอบ (พ.ศ.2558)

จากภาพที่ 3.2 แสดงตำแหน่งของโครงการก่อสร้างในบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้ ซึ่งสอดคล้องกับผลในตารางที่ 4.1 ซึ่งมีผลต่อความคงทนของคอนกรีตเนื่องจากคาร์บอนเข้มข้นในระดับที่ค่อนข้างสูง



ภาพที่ 3.2 แผนที่แสดงตำแหน่งของสะพานลอยในเขตชุมชนจังหวัดนครปฐมที่ใช้ศึกษา

จากภาพที่ 3.3 แสดงให้เห็นสภาพแวดล้อมที่มีการจราจรหนาแน่น ซึ่งโครงสร้างสะพานลอยทั้ง 15 สะพานลอยที่แสดงดังตารางที่ 3.1 มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมดังกล่าว ซึ่งมีความเสี่ยงต่อการเกิดปัญหาคาร์บอนเข้มข้นในอัตราที่สูง



ภาพที่ 3.3 สภาพแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเกิดคาร์บอนเข้มข้น

### 3.2 การตรวจพินิจความเสียหายของโครงสร้างสะพานลอย

เป็นการตรวจสอบโครงสร้างเบื้องต้นเพื่อวิเคราะห์สภาพความเสียหายของสะพานลอยในเขตชุมชนจังหวัดนครปฐม โดยมีขั้นตอนระเบียบการวิจัย สามารถสรุปได้ดังนี้

#### 3.2.1 ทำการคัดเลือกสะพานลอยตัวอย่างและเข้าตรวจสอบพินิจ

3.2.2 เมื่อกำหนดสะพานลอยที่ต้องการตรวจสอบแล้ว ส่วนต่อมาก็คือการวางแผนการตรวจสอบ มีดังต่อไปนี้

- รวบรวมข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการตรวจสอบหน้างาน เช่น แบบโครงสร้างสะพานลอย แบบสถาปัตยกรรมตัวอาคารข้อมูลวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการก่อสร้าง และข้อมูลการซ่อมแซมบำรุงรักษาของโครงสร้างสะพานลอย เป็นต้น

- การเดินสำรวจสภาพโครงสร้างสะพานลอย โดยใช้การจดบันทึกตำแหน่งและลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสะพานลอยลงในแบบฟอร์มการบันทึกความเสียหาย ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ดังแสดงในภาพที่ 3.4 พร้อมกับถ่ายรูปประกอบเพื่อนำมาวิเคราะห์ความเสียหาย

- นำข้อมูลที่บันทึกได้ จำแนกและวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้น



รหัสสะพานคนเดินข้าม.....

## แบบบันทึกการสำรวจ

## ข้อมูลพื้นฐานสะพานคนเดินข้าม (Pedestrian Bridge Inventory)

ผู้บันทึก .....  
วันที่ ..... เวลา.....

สำนักทางหลวง/สำนักงานทางหลวง..... แขวงทางหลวง/สำนักงานบำรุงทาง.....

หมวดการทาง ..... หมายเลขทางหลวง ..... หมายเลขเลขตอนควบคุม .....

ชื่อตอนควบคุม ..... กม. ที่ .....

ละติจูด..... ลองจิจูด .....

ชนิดของสะพานคนเดินข้าม.....วัสดุโครงสร้าง ☐ คอนกรีต ☐ เหล็ก

ช่วง (Span) ..... เมตร ความยาวรวม ..... เมตร

ความกว้างผิวพื้น ..... เมตร ความสูงตอม่อถึงผิวถนน ..... เมตร

อื่นๆ .....

## จำนวนองค์ประกอบ

| ประเภทองค์ประกอบของสะพาน             | จำนวน | หมายเหตุ |
|--------------------------------------|-------|----------|
| 1. ผิวทาง (Wearing Surface)          |       |          |
| 2. คานคานยาว (Girder)                |       |          |
| 3. ค้ำยันคานคานยาว (Diaphragm)       |       |          |
| 4. เสาตอม่อ (Pier)                   |       |          |
| 5. แผ่นรองรับคาน (Bearing)           |       |          |
| 6. รอยต่อเพื่อขยาย (Expansion Joint) |       |          |
| 7. ราวสะพาน (Railing)                |       |          |
| 8. ระบบระบายน้ำ (Drainage)           |       |          |
| 9. ระบบแสงสว่าง (Lighting)           |       |          |
|                                      |       |          |
|                                      |       |          |
|                                      |       |          |

## ข้อเสนอแนะ

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

### 3.3 การทดสอบแบบไม่ทำลาย

#### 3.3.1 การหาตำแหน่งเหล็กและวัดระยะหุ้มเหล็ก

ในการวิจัยนี้มีการทดสอบวัดระยะหุ้มเหล็กด้วยเครื่องวัดระยะหุ้มเหล็ก (Cover Meter) ก่อนที่จะเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบระยะคาร์บอนชั้น ในตำแหน่งที่ใกล้กับตำแหน่งที่เจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตทดสอบระยะคาร์บอนชั้น โดยแต่ละตำแหน่งที่เจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตจะวัดค่าระยะหุ้มเหล็กเสริม 4 ค่า เก็บข้อมูลระยะหุ้มเหล็กเสริม 6 ตำแหน่งต่อสะพานลอย 1 แห่ง ทำให้ได้ค่าระยะหุ้มเหล็กเสริมทั้งหมด 24 ค่าต่อสะพานลอย 1 แห่ง ดังแสดงในภาพที่ 3.5ก

#### 3.2.3 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก

ในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตครั้งนี้ ใช้ค้อนกระแทกแบบชมิทท์ (Schmidt Hammer) โดยการตรวจสอบใช้ค่าการสะท้อน Rebound hammer เพื่อวัดกำลังรับแรงอัดและความสม่ำเสมอของกำลังรับแรงอัดของโครงสร้าง ในตำแหน่งที่ใกล้กับตำแหน่งที่เจาะเก็บตัวอย่าง โดยแต่ละตำแหน่งเก็บค่าการสะท้อนกลับของคอนกรีต 36 ค่า จุดที่การวัดค่าการสะท้อนแต่ละครั้งต้องห่างกันประมาณ 25 มิลลิเมตร ซึ่งในแต่ละโครงสร้างสะพานลอยเก็บ 6 ตำแหน่ง นั่นคือเก็บทั้งหมด 216 ค่าต่อ 1 สะพานลอย ดังแสดงในภาพที่ 3.5ข



(ก) การวัดระยะหุ้มเหล็ก

(ข) การวัดค่าการสะท้อน

ภาพที่ 3.5 การทดสอบแบบไม่ทำลาย

### 3.4 การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

ในการตรวจวัดครั้งนี้ใช้เครื่องวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยี่ห้อ EXTECH รุ่น CO250 เก็บวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) บริเวณโครงสร้างสะพานลอยที่ทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตทดสอบระยะคาร์บอนชั้น ทำการวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ทั้งหมด 3 เดือน (ในช่วงเดือนมีนาคม เมษายน และพฤษภาคม พ.ศ.2558) โดยในแต่ละวันจะวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ 3 ช่วงเวลาคือ ช่วงเช้า (เวลาประมาณ 9-10 น.) ช่วงเที่ยง (เวลาประมาณ 12-13 น.) และช่วงเย็น (เวลาประมาณ 17-18 น.) ในแต่ละสะพานลอยที่มีการ

เจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่น จะเก็บค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์ 162 ค่า ทั้งนี้การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ ครั้งนี้เป็นกรวัด ณ ช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ซึ่งอาจจะไม่ใช่ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ตลอดทั้งปี รวมถึงอาจจะไม่เป็นตัวแทนที่ดีของข้อมูลดังกล่าว อย่างไรก็ตามเพื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างสะพานลอยครั้งนี้ จะใช้ข้อมูลที่วัดได้ ณ ช่วงเวลาดังกล่าว และมีการวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์อย่างต่อเนื่องเพื่อนำมาปรับปรุงการวิเคราะห์ต่อไปในอนาคต

### 3.5 การทดสอบคาร์บอนเนชั่น

ทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่น (Carbonation Depth) จากบริเวณเสาของสะพานลอย ที่ระดับความสูง 1.50 – 2.50 เมตร (ทั้ง 15 สะพานลอย) โดยเจาะเก็บตัวอย่าง 6 ตัวอย่างต่อ 1 สะพานลอย โดยตัวอย่างคอนกรีตที่นำมาทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่นครั้งนี้ได้จากการเจาะด้วยสว่านหัวเจาะแบบ HOLES AW ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 เซนติเมตร ลึกประมาณ 5-6 เซนติเมตรจากตำแหน่งที่กล่าวมาข้างต้น โดยนำตัวอย่างคอนกรีตดังกล่าวมาทำการผ่าซีกเพื่อทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่น ปฏิกริยาคาร์บอนเนชั่นทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง (โดยทั่วไปค่า pH ของคอนกรีตประมาณ 13) โดยฉีดยาด้วยสารละลายฟีนอล์ฟธาเลอินไปยังคอนกรีตที่ผ่าซีกแล้ว ซึ่งสารละลายฟีนอล์ฟธาเลอินจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูเข้มในบริเวณที่ค่า pH ของคอนกรีตมีค่ามากกว่า 9 จากนั้นวัดค่าระยะคาร์บอนเนชั่น ซึ่งเป็นระยะที่คอนกรีตไม่มีการเปลี่ยนแปลงสี ดังแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 การทดสอบและวัดระยะคาร์บอนเนชั่น

### 3.6 วิเคราะห์ผลการศึกษา

3.6.1 วิเคราะห์ผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานลอย ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นของสะพานลอย

3.6.2 วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมของเหล็กเสริม เนื่องจากระยะคาร์บอนเนชั่นกับอายุของโครงสร้าง

3.6.3 วิเคราะห์และเปรียบเทียบมาตรฐานการออกแบบเพื่อพิจารณาความคงทนกับโครงสร้างที่ต้องเผชิญสิ่งแวดล้อมที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

#### 4.1 การสำรวจเก็บข้อมูลความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานลอยที่อยู่ในพื้นที่ที่แตกต่างกัน

##### 4.1.1 รายละเอียดโครงสร้างที่สำรวจความเสียหาย

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ไม่ว่าจะเป็น อาคาร สะพาน เขื่อน ถนน หรือ โครงสร้างในลักษณะอื่นๆ ที่ได้ทำการออกแบบไว้โดยกำหนดให้โครงสร้างดังกล่าวสามารถรับแรงกระทำที่สูงสุดได้ค่าหนึ่ง ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าว คือช่วงของอายุนั่นเอง สาเหตุที่โครงสร้างมีอายุการใช้งานที่จำกัด เกิดจากการเสื่อมสภาพและการเสียหายของวัสดุเป็นหลัก ซึ่งสาเหตุของการเสื่อมสภาพหรือการเสียหายของวัสดุดังกล่าวอาจเกิดจากสมบัติทางกลของโครงสร้าง เช่น การล้า การผุกร่อน การรับน้ำหนักที่สูงเกินไป หรือการเสื่อมสภาพทางปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ รวมถึงปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมโดยรอบ เช่น อากาศ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้น อุณหภูมิ เป็นต้น

จากการศึกษาสภาพแวดล้อมจังหวัดนครปฐมที่มีสะพานลอยตั้งอยู่ พบว่าจังหวัดนครปฐมเป็นจังหวัดหนึ่งในภาคกลางด้านตะวันตก ตั้งอยู่บริเวณลุ่มแม่น้ำท่าจีนซึ่งเป็นพื้นที่บริเวณที่ราบลุ่มภาคกลาง อยู่ห่างจากกรุงเทพมหานครไปตามเส้นทาง ถนนเพชรเกษม 56 กิโลเมตร หรือตามเส้นทางถนนบรมราชชนนี (ถนนปิ่นเกล้า – นครชัยศรี) 51 กิโลเมตร นอกจากนี้ยังพบอีกว่าจังหวัดนครปฐมมีการขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่องเพราะเป็นเขตปริมณฑลของกรุงเทพมหานคร มีจำนวนประชากรอาศัยอยู่หนาแน่น มีการจราจรที่หนาแน่นต่อเนื่อง จึงทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สะพานลอยในเขตพื้นที่ดังกล่าว มีโอกาสต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นจากสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงในบริเวณดังกล่าวได้ ซึ่งโครงสร้างอาจเสี่ยงต่อการเกิดสนิม หากไม่มีการบำรุงรักษาที่เหมาะสม โครงสร้างอาจเกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมจนเกิดการดันคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าว และโครงสร้างวิบัติในที่สุดได้

ดังนั้นจากสภาพการใช้งานของโครงสร้างสะพานลอยที่อยู่ในจังหวัดนครปฐม ซึ่งเป็นเขตปริมณฑล สภาพความเสียหายต่างๆก็มิให้เหินห่าง การสำรวจความเสียหายของโครงสร้างสะพานลอยเบื้องต้นจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นมากพอสมควร สามารถสรุปความเสียหายเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นของสะพานลอยได้ตามตารางที่ 4.1 เพื่อจะนำไปสู่การตรวจสอบเชิงลึกต่อไป ซึ่งภาพที่ 4.1 แสดงตัวอย่างภาพรวมส่วนประกอบของสะพานลอย

#### สะพานลอยพื้นที่อำเภอกำแพงแสน

1. สะพานลอย ก.ม.24+166 (โลตัสกำแพงแสน) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 39 เมตร กว้าง 2.40 เมตร สูง 5.00 เมตร สร้างแล้วเสร็จเมื่อ 29 ธันวาคม 2542
2. สะพานลอย ก.ม.23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 39 เมตร กว้าง 2.40 เมตร สูง 5.00 เมตร สร้างแล้วเสร็จเมื่อ 29 ธันวาคม 2542
3. สะพานลอย ก.ม.19+235 (หนองปลาไหล) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 39 เมตร กว้าง 2.40 เมตร สูง 5.80 เมตร สร้างแล้วเสร็จเมื่อ 29 ธันวาคม 2542

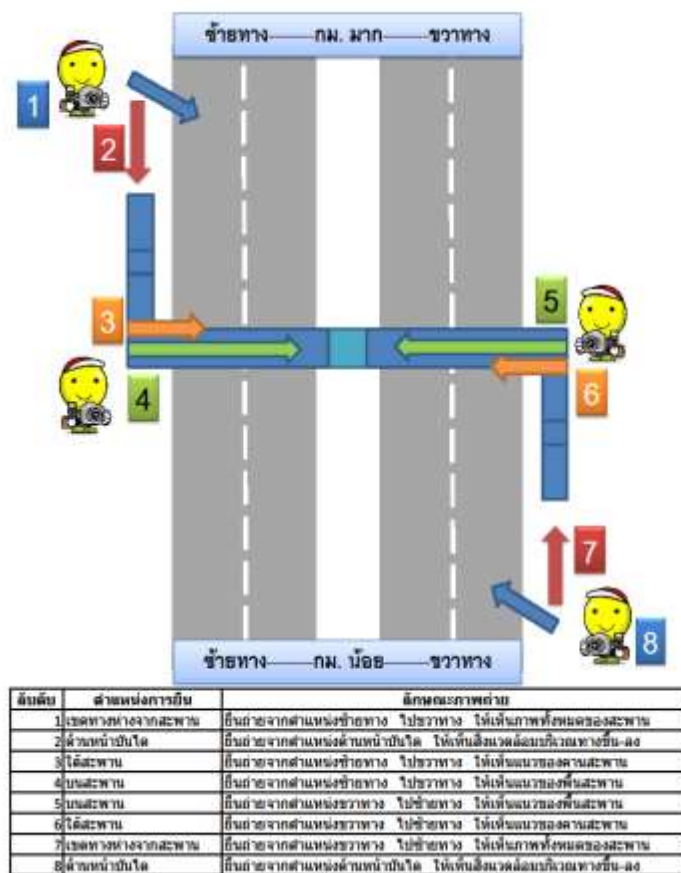
4. สะพานลอย ก.ม.17+835 (ทุ่งเศรษฐี) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 39 เมตร กว้าง 2.40 เมตร สูง 5.80 เมตร สร้างแล้วเสร็จเมื่อ 29 ธันวาคม 2542
5. สะพานลอย ก.ม.15+760 (ลาดหญ้าไทร) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 41 เมตร กว้าง 1.60 เมตร สูง 6.00 เมตร สร้างแล้วเสร็จเมื่อ 29 ธันวาคม 2542

#### สะพานลอยพื้นที่อำเภอเมือง

6. สะพาน ก.ม.5+650 (กิโล 5) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 40.25 เมตร กว้าง 1.40 เมตร สูง 5.90 เมตร สร้างแล้วเสร็จเมื่อ 29 ธันวาคม 2542
7. สะพานลอย ก.ม.66+780 (ร.ร.พัฒนบริหารธุรกิจ) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 39.50 เมตร กว้าง 2.40 เมตร สูง 5.90 เมตร สร้างแล้วเสร็จเมื่อ 15 มีนาคม 2543
8. สะพานลอย ก.ม.64+075 (หนองดินแดง) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 42.50 เมตร กว้าง 2.40 เมตร สูง 5.50 เมตร สร้างแล้วเสร็จเมื่อ 1 กุมภาพันธ์ 2542
9. สะพานลอย ก.ม.63+230 (ศาลยาวชน) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 42.50 เมตร กว้าง 2.30 เมตร สูง 5.70 เมตร สร้างแล้วเสร็จเมื่อ 28 เมษายน 2544
10. สะพานลอย ก.ม.61+585 (บ้านหนองหิน) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 46.10 เมตร กว้าง 2.40 เมตร สูง 6.00 เมตร สร้างแล้วเสร็จเมื่อ 30 พฤษภาคม 2546
11. สะพานลอย ก.ม.59+785 (วัดลาดปลาเค้า) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 42.90 เมตร กว้าง 2.40 เมตร สูง 5.90 เมตร สร้างแล้วเสร็จเมื่อ 20 พฤษภาคม 2546
12. สะพานลอย ก.ม.50+174 (วัดธรรมศาลา) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 43.00 เมตร กว้าง 2.40 เมตร สูง 5.50 เมตร สร้างแล้วเสร็จเมื่อ 1 มกราคม 2541

#### สะพานลอยพื้นที่อำเภอนครชัยศรี

13. สะพานลอย ก.ม.47+485 (วัดเสถียร) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 43.00 เมตร กว้าง 2.40 เมตร สูง 5.00 เมตร สร้างแล้วเสร็จเมื่อ 21 ธันวาคม 2543
14. สะพานลอย ก.ม.45+648 (วัดศิระชะทอง) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 43.00 เมตร กว้าง 2.40 เมตร สูง 5.90 เมตร สร้างแล้วเสร็จเมื่อ 1 มกราคม 2541
15. สะพานลอย ก.ม.42+960 (วัดท่าตำหนัก) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 43.00 เมตร กว้าง 2.40 เมตร สูง 5.70 เมตร สร้างแล้วเสร็จเมื่อ 30 ตุลาคม 2535



ภาพที่ 4.1 ส่วนประกอบสะพานลอย

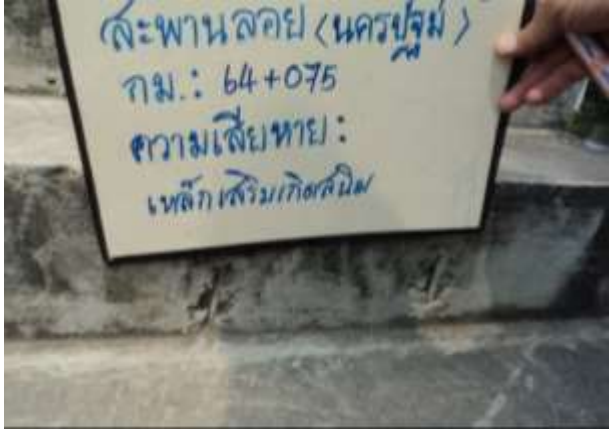
ตารางที่ 4.1 สาเหตุและลักษณะความเสียหายที่พบในโครงสร้างสะพานลอยคอนกรีตเสริมเหล็ก

| ลักษณะความเสียหาย                                                                                                             | สาเหตุ                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>สะพานลอย ก.ม. 24+166 (โลตัสกำแพงแสน)</p> | <p><b>ปัญหา</b> เหล็กเสริมเกิดสนิมทำให้ผิวคอนกรีตหลุดล่อน</p> <p><b>สาเหตุ</b> ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่จุดนั้นไม่เพียงพอ การหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากการใช้งาน</p> <p>(พื้นที่อำเภอกำแพงแสน)</p> |
|  <p>สะพานลอย ก.ม. 19+235 (หนองปลาไหล)</p>   | <p><b>ปัญหา</b> การแตกร้าวคอนกรีตเป็นทางยาวช่วงท้องพื้นบันได</p> <p><b>สาเหตุ</b> เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีต เหล็กเสริมเกิดสนิม</p> <p>(พื้นที่อำเภอกำแพงแสน)</p>                                                  |
|  <p>สะพานลอย ก.ม. 15+760 (ลาดหญ้าไทร)</p>  | <p><b>ปัญหา</b> การหลุดล่อนของคอนกรีตเหล็กเกิดสนิม ช่วงท้องพื้นบันได</p> <p><b>สาเหตุ</b> เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีต เหล็กเสริมเกิดสนิม</p> <p>(พื้นที่อำเภอกำแพงแสน)</p>                                          |

ตารางที่ 4.1 สาเหตุและลักษณะความเสียหายที่พบในโครงสร้างสะพานลอยคอนกรีตเสริมเหล็ก (ต่อ)

| ลักษณะความเสียหาย                                                                                                                      | สาเหตุ                                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>สะพานลอย ก.ม. 15+760 (ลาดหญ้าไทร)</p>             | <p><b>ปัญหา</b> เหล็กเสริมเกิดสนิมเกิดสนิม</p> <p><b>สาเหตุ</b> ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่จุดนั้นไม่เพียงพอ การหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีต</p> <p>(พื้นที่อำเภอกำแพงแสน)</p>                             |
|  <p>สะพานลอย ก.ม. 66+780 (ร.ร.พัฒนบริหารธุรกิจ)</p>  | <p><b>ปัญหา</b> เหล็กเสริมเกิดสนิมเกิดสนิม</p> <p><b>สาเหตุ</b> ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่จุดนั้นไม่เพียงพอ การหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีต</p> <p>(พื้นที่อำเภอเมือง)</p>                                |
|  <p>สะพานลอย ก.ม. 66+780 (ร.ร.พัฒนบริหารธุรกิจ)</p> | <p><b>ปัญหา</b> เหล็กเสริมเกิดสนิมเกิดสนิมทำให้ผิวคอนกรีตหลุดล่อน</p> <p><b>สาเหตุ</b> ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่จุดนั้นไม่เพียงพอ การหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากการใช้งาน</p> <p>(พื้นที่อำเภอเมือง)</p> |

ตารางที่ 4.1 สาเหตุและลักษณะความเสียหายที่พบในโครงสร้างสะพานลอยคอนกรีตเสริมเหล็ก (ต่อ)

| ลักษณะความเสียหาย                                                                                                         | สาเหตุ                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>โครงการ กม. 64+075 (หนองดินแดง)</p>  | <p><b>ปัญหา</b> เหล็กเสริมเกิดสนิมเกิดสนิม</p> <p><b>สาเหตุ</b> ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่จุดนั้นไม่เพียงพอ การหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีต</p> <p>(พื้นที่อำเภอเมือง)</p>                                |
|  <p>โครงการ กม. 64+075 (หนองดินแดง)</p> | <p><b>ปัญหา</b> เหล็กเสริมเกิดสนิมเกิดสนิมทำให้ผิวคอนกรีตหลุดล่อน</p> <p><b>สาเหตุ</b> ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่จุดนั้นไม่เพียงพอ การหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความคงทน</p> <p>(พื้นที่อำเภอเมือง)</p>  |
|  <p>โครงการ กม. 63+230 (ศาลยาวชน)</p>  | <p><b>ปัญหา</b> เหล็กเสริมเกิดสนิมเกิดสนิมทำให้ผิวคอนกรีตหลุดล่อน</p> <p><b>สาเหตุ</b> ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่จุดนั้นไม่เพียงพอ การหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากการใช้งาน</p> <p>(พื้นที่อำเภอเมือง)</p> |

ตารางที่ 4.1 สาเหตุและลักษณะความเสียหายที่พบในโครงสร้างสะพานลอยคอนกรีตเสริมเหล็ก (ต่อ)

| ลักษณะความเสียหาย                                                                                                             | สาเหตุ                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>โครงการ กม. 63+230 (ศาลยาวาชน)</p>       | <p><b>ปัญหา</b> เหล็กเสริมเกิดสนิมเกิดสนิมทำให้ผิวคอนกรีตหลุดล่อน</p> <p><b>สาเหตุ</b> ระยะคานกรีตหุ้มเหล็กที่จุดนั้นไม่เพียงพอ การหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากการใช้งาน</p> <p>(พื้นที่อำเภอเมือง)</p> |
|  <p>โครงการ กม. 61+585 (บ้านหนองหิน)</p>    | <p><b>ปัญหา</b> การแตกร้าวคอนกรีตโครงสร้างบันได</p> <p><b>สาเหตุ</b> เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีต รอยร้าวเหล็กเสริมเกิดสนิม</p> <p>(พื้นที่อำเภอเมือง)</p>                                                                |
|  <p>โครงการ กม. 59+785 (วัดลาดปลาเค้า)</p> | <p><b>ปัญหา</b> เหล็กเสริมเกิดสนิมเกิดสนิมทำให้ผิวคอนกรีตหลุดล่อน</p> <p><b>สาเหตุ</b> ระยะคานกรีตหุ้มเหล็กที่จุดนั้นไม่เพียงพอ การหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากการใช้งาน</p> <p>(พื้นที่อำเภอเมือง)</p> |

ตารางที่ 4.1 สาเหตุและลักษณะความเสียหายที่พบในโครงสร้างสะพานลอยคอนกรีตเสริมเหล็ก (ต่อ)

| ลักษณะความเสียหาย                                                                                                            | สาเหตุ                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>โครงการ ก.ม. 59+785 (วัดลาดปลาเค้า)</p> | <p><b>ปัญหา</b> เหล็กเสริมเกิดสนิมเกิดสนิมทำให้ผิวคอนกรีตหลุดล่อน</p> <p><b>สาเหตุ</b> ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่จุดนั้นไม่เพียงพอ การหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากการใช้งาน</p> <p>(พื้นที่อำเภอเมือง)</p>                        |
|  <p>โครงการ ก.ม. 47+485 (วัดเสถียร)</p>    | <p><b>ปัญหา</b> เหล็กเสริมเกิดสนิมเกิดสนิมทำให้ผิวคอนกรีตหลุดล่อน</p> <p><b>สาเหตุ</b> ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่จุดนั้นไม่เพียงพอ การหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความคงทน</p> <p>(พื้นที่อำเภอนครชัยศรี)</p>                     |
|  <p>โครงการ ก.ม. 45+648 (วัดศิระทอง)</p>  | <p><b>ปัญหา</b> เหล็กเสริมบริเวณคานรับท้องพื้นเกิดสนิมเกิดสนิมทำให้ผิวคอนกรีตหลุดล่อน</p> <p><b>สาเหตุ</b> ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่จุดนั้นไม่เพียงพอ การหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความคงทน</p> <p>(พื้นที่อำเภอนครชัยศรี)</p> |

ตารางที่ 4.1 สาเหตุและลักษณะความเสียหายที่พบในโครงสร้างสะพานลอยคอนกรีตเสริมเหล็ก (ต่อ)

| ลักษณะความเสียหาย                                                                                                             | สาเหตุ                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>โครงการ ก.ม. 45+648 (วัดศิระชะทอง)</p>   | <p><b>ปัญหา</b> เหล็กเสริมบริเวณคานรับท้องพื้นเกิดสนิมเกิดสนิมทำให้ผิวคอนกรีตหลุดล่อน</p> <p><b>สาเหตุ</b> ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่จุดนั้นไม่เพียงพอ การหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความคงทน (พื้นที่อำเภอนครชัยศรี)</p>    |
|  <p>โครงการ ก.ม. 45+648 (วัดศิระชะทอง)</p>  | <p><b>ปัญหา</b> การแตกร้าวคอนกรีตเป็นทางยาวช่วงคานรับพื้นบันได</p> <p><b>สาเหตุ</b> เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีต เหล็กเสริมเกิดสนิม (พื้นที่อำเภอนครชัยศรี)</p>                                                                              |
|  <p>โครงการ ก.ม. 42+960 (วัดท่าตำหนัก)</p> | <p><b>ปัญหา</b> เหล็กเสริมเกิดสนิมเกิดสนิมบริเวณคานรับพื้นทางเดินทำให้ผิวคอนกรีตหลุดล่อน</p> <p><b>สาเหตุ</b> ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่จุดนั้นไม่เพียงพอ การหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความคงทน (พื้นที่อำเภอนครชัยศรี)</p> |

ตารางที่ 4.1 สาเหตุและลักษณะความเสียหายที่พบในโครงสร้างสะพานลอยคอนกรีตเสริมเหล็ก (ต่อ)

| ลักษณะความเสียหาย                                                                                                           | สาเหตุ                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>โครงการ ก.ม. 42+960 (วัดท่าตำหนัก)</p> | <p><b>ปัญหา</b> เหล็กเสริมเกิดสนิมเกิดสนิม ทำให้ผิวคอนกรีตหลุดล่อน</p> <p><b>สาเหตุ</b> ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่จุดนั้นไม่เพียงพอ การหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความคงทน (พื้นที่อำเภอ นครชัยศรี)</p> |

## 4.2 สรุปสภาพความเสียหายที่พบ

### 4.2.1 ความเสียหายสะพานลอย อำเภอกำแพงแสน นครปฐม

ความเสียหายที่พบจากการตรวจสอบด้วยตาเปล่าของสะพานลอยที่ตั้งอยู่ในอำเภอกำแพงแสน นครปฐม จำนวน 5 แห่ง ได้แก่ สะพานลอย ก.ม. 24+166 (โลตัสกำแพงแสน), ก.ม. 23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา), ก.ม. 19+235 (หนองปลาไหล), ก.ม. 17+835 (ทุ่งเศรษฐี) และก.ม. 15+760 (ลาดหญ้าไทร) พบว่าปัญหาส่วนใหญ่เกิดจากการกะเทาะของผิวคอนกรีต เหล็กเสริมเกิดสนิม (เป็นบางจุดของโครงสร้าง) คอนกรีตเกิดการแตกร้าว แต่ประเด็นดังกล่าวยังไม่ค่อยรุนแรงมาก ซึ่งเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานโครงสร้าง หรือเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความคงทน เช่น การเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนขึ้น คลอไรด์ เป็นต้น และอาจจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างในระยะยาวได้

### 4.2.2 ความเสียหายสะพานลอย อำเภอเมือง นครปฐม

ความเสียหายที่พบจากการตรวจสอบด้วยตาเปล่าของสะพานลอยที่ตั้งอยู่ในอำเภอเมือง นครปฐม จำนวน 7 แห่ง ได้แก่ สะพานลอย ก.ม. 5+650 (กิโล 5), ก.ม. 66+780 (ร.ร.พัฒนาบริหารธุรกิจ), ก.ม. 64+075 (หนองดินแดง), ก.ม. 63+320 (ศาลยาวชน), ก.ม. 61+585 (บ้านหนองหิน), ก.ม. 59+785 (วัดลาดปลาเค้า) และ ก.ม. 50+174 (วัดธรรมศาลา) พบว่าทุกสะพานลอยเกิดปัญหาเกี่ยวกับเหล็กเสริมเกิดสนิมและการกะเทาะของคอนกรีตหุ้มเหล็กได้อย่างชัดเจน คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเป็นทางยาว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างในพื้นที่ดังกล่าวเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความคงทน เช่น การเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนขึ้น คลอไรด์ เป็นต้น และคาดว่าจะมีรุนแรงมากขึ้นตามลำดับ ซึ่งเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานโครงสร้างและอาจจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างในระยะยาวได้เช่นกัน

#### 4.2.3 ความเสียหายสะพานลอย อำเภอนครชัยศรี นครปฐม

ความเสียหายที่พบจากการตรวจสอบด้วยตาเปล่าของสะพานลอยที่ตั้งอยู่ในอำเภอ นครชัยศรี นครปฐม จำนวน 3 แห่ง ได้แก่ สะพานลอย ก.ม. 47+485 (วัดเสถียร), ก.ม. 45+648 (วัดศิระทอง) และ ก.ม. 42+960 (วัดท่าตำหนัก) พบว่าสะพานลอยเกิดปัญหาเกี่ยวกับเหล็กเสริมเกิดสนิม (เป็นบางจุดของโครงสร้าง) และการกะเทาะของคอนกรีตหุ้มเหล็กได้อย่างชัดเจน คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเช่นกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างในพื้นที่ดังกล่าวเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความคองทน เช่น การเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนชั้น คลอไรด์ เป็นต้น และคาดว่าจะมีรุนแรงมากขึ้นตามลำดับ ซึ่งเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการใช้งานโครงสร้างและอาจจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างในระยะยาวได้

จากระดับความเสียหายของแต่ละสะพานลอยในเขตชุมชน จังหวัดนครปฐมนั้น ปัญหาความรุนแรงต่างๆเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนชั้นที่เกิดขึ้นกับตัวโครงสร้างสะพานลอยเป็นหลัก พบว่าความเสียหายที่รุนแรงมักจะอยู่กับสะพานลอยที่มีจำนวนความเสียหายประเภทดังกล่าวมาก ด้วยเหตุนี้ความเสียหายจึงมีความสัมพันธ์ทางอ้อมกับความรุนแรงของความเสียหายแต่ละประเภทในแต่ละโครงสร้างสะพานลอยด้วย

#### 4.3 การประเมินกำลังอัดของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก (Schmidt Hammer)

จากการวัดค่าการสะท้อนเพื่อประเมินกำลังอัดของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก พบว่าค่าการสะท้อนที่วัดได้ของสะพานลอย ก.ม.24+166 (โลตส์กำแพงแสน), ก.ม.23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา), ก.ม.19+235 (หนองปลาไหล), ก.ม.17+835 (ทุ่งเศรษฐี), ก.ม.15+760 (ลาดหญ้าไทร), ก.ม.5+650 (กิโล 5), ก.ม.66+780 (ร.ร.พัฒนบริหารธุรกิจ), ก.ม.64+075 (หนองดินแดง), ก.ม.63+230 (ศาลยาวชน), ก.ม.61+585 (บ้านหนองหิน), ก.ม.59+785 (วัดลาดปลาเค้า), ก.ม.50+174 (วัดธรรมศาลา), ก.ม.47+485 (วัดเสถียร), ก.ม.45+648 (วัดศิระทอง) และ ก.ม.42+960 (วัดท่าตำหนัก) ดังแสดงในภาพที่ 4.2 ถึง 4.4 ตามลำดับ มีการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

ในส่วนของสะพานลอยอำเภอกำแพงแสน นครปฐม คือสะพานลอย ก.ม.24+166 (โลตส์กำแพงแสน), ก.ม.23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา), ก.ม.19+235 (หนองปลาไหล), ก.ม.17+835 (ทุ่งเศรษฐี), ก.ม.15+760 (ลาดหญ้าไทร) ค่าการกระจายตัวของการสะท้อนที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 41-43 ดังแสดงในภาพที่ 4.2 โดยมีค่ามากกว่าสะพานลอยอำเภอเมือง นครปฐม ซึ่งค่าการกระจายตัวของการสะท้อนที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 35-37 ดังแสดงในภาพที่ 4.3 นอกจากนี้สะพานลอยอำเภอ นครชัยศรี นครปฐม ค่าการกระจายตัวของการสะท้อนที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 39-41 ดังแสดงในภาพที่ 4.4 ตามลำดับ

จากการกระจายตัวของค่า Rebound Number สามารถคำนวณค่ากำลังอัดเฉลี่ยตามความสัมพันธ์ของสมการ (JSCE) [9, 35] โดยอาศัยข้อมูลความสัมพันธ์จากสมการที่ (4.1)

$$f'_c = -176.4 + (12.446 \times RN) \quad (4.1)$$

โดยที่  $f'_c$  คือค่าประมาณการกำลังอัดของคอนกรีต (กก./ซม.<sup>2</sup>)

RN คือค่าการสะท้อนของ Schmidt Hammer

ซึ่งได้ค่าดังตารางที่ 4.2 พบว่ากำลังอัดเฉลี่ยทั้ง 15 แห่งอยู่ระหว่าง 213-389 กก./ชม.<sup>2</sup> ดังแสดงในตารางที่ 4.2 มีค่าสูงกว่าเกณฑ์ออกแบบมาตรฐานที่กรมทางหลวงกำหนดไว้คือ 210 กก./ชม.<sup>2</sup> [35]

นอกจากนั้นยังพบว่าค่ากำลังอัดเฉลี่ยของสะพานอำเภอกำแพงแสนมีค่ามากกว่าสะพานลอยอำเภอเมืองและอำเภอนครชัยศรีซึ่งสอดคล้องกับค่าการกระจายตัว Rebound Number ทั้งนี้เนื่องจาก

1) อายุการใช้งานของโครงสร้างสะพานที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลทำให้โครงสร้างคอนกรีตที่ก่อสร้างระยะเวลายาวนานเกิดการเสื่อมสภาพมากกว่าโครงสร้างที่ก่อสร้างภายหลัง

2) สภาพแวดล้อมที่ต่างกันคือในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้นกว่าในเขตปริมณฑลอื่น ซึ่งมีผลทำให้คอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาพแวดล้อมได้เร็วขึ้น

3) คุณภาพของคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างของแต่ละโครงการแตกต่างกัน ซึ่งมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเกิดความแตกต่างกัน

แต่อย่างไรก็ตามกำลังอัดที่ได้จากความสัมพันธ์ของ (JSCE) ของโครงสร้างสะพานลอยที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด อาจจะเป็นตัวบ่งชี้บอกผลด้านกำลังอัดและคุณภาพของคอนกรีตได้ในระดับหนึ่ง

ตารางที่ 4.2 กำลังอัดเฉลี่ยที่ได้จากความสัมพันธ์ Japan Society of Civil Engineers (JSCE)

| โครงการที่เข้าตรวจสอบ             | สถานที่ตั้ง<br>(อำเภอ) | Schmidt Hammer                            |                          | อัตราส่วน<br>น้ำต่อวัสดุ<br>ประสาน<br>(W/B) |
|-----------------------------------|------------------------|-------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------|
|                                   |                        | กำลังอัดเฉลี่ย<br>(กก./ชม. <sup>2</sup> ) | ส่วนเบี่ยงเบน<br>มาตรฐาน |                                             |
| ก.ม.24+166 (โลตัสกำแพงแสน)        | กำแพงแสน               | 331.98                                    | 38.31                    | 0.55                                        |
| ก.ม.23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา)    | กำแพงแสน               | 388.57                                    | 24.52                    | 0.48                                        |
| ก.ม.19+235 (หนองปลาไหล)           | กำแพงแสน               | 356.19                                    | 28.43                    | 0.53                                        |
| ก.ม.17+835 (ทุ่งเศรษฐี)           | กำแพงแสน               | 358.95                                    | 30.82                    | 0.53                                        |
| ก.ม.15+760 (ลาดหญ้าไทร)           | กำแพงแสน               | 325.07                                    | 35.86                    | 0.56                                        |
| ก.ม.5+650 (กิโล 5)                | เมือง                  | 355.61                                    | 25.24                    | 0.53                                        |
| ก.ม.66+780 (ร.ร.พัฒนบริหารธุรกิจ) | เมือง                  | 273.79                                    | 16.78                    | 0.62                                        |
| ก.ม.64+075 (หนองดินแดง)           | เมือง                  | 218.82                                    | 17.81                    | 0.71                                        |
| ก.ม.63+230 (ศาลยาวชน)             | เมือง                  | 213.11                                    | 21.95                    | 0.71                                        |
| ก.ม.61+585 (บ้านหนองหิน)          | เมือง                  | 216.51                                    | 23.05                    | 0.71                                        |
| ก.ม.59+785 (วัดลาดปลาเค้า)        | เมือง                  | 235.18                                    | 13.31                    | 0.69                                        |
| ก.ม.50+174 (วัดธรรมศาลา)          | เมือง                  | 295.17                                    | 37.39                    | 0.59                                        |
| ก.ม.47+485 (วัดเสถียร)            | นครชัยศรี              | 322.42                                    | 46.53                    | 0.56                                        |
| ก.ม.45+648 (วัดศิระทอง)           | นครชัยศรี              | 342.53                                    | 37.91                    | 0.54                                        |
| ก.ม.42+960 (วัดท่าตำหนัก)         | นครชัยศรี              | 314.87                                    | 18.60                    | 0.58                                        |

แต่อย่างไรก็ตามกำลังอัดที่ได้จากความสัมพันธ์ของ JSCE ของโครงสร้างสะพานลอยที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด มีการใช้ค่าการกระจายตัวของ Rebound Number ที่ทดสอบ ซึ่งบางครั้งก็อาจจะทำให้การบ่งบอกผลด้านกำลังอัดและคุณภาพคอนกรีตไม่ชัดเจนยิ่งนัก

จากตารางที่ 4.2 พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลกำลังอัดมีค่าในระดับหนึ่ง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้

- 1) ความผิดพลาดของเครื่องมือวัดกำลังอัด
- 2) ความผิดพลาดเนื่องจากการอ่านค่ากำลังอัด

ซึ่งจากสองสาเหตุดังกล่าวนี้อาจทำให้ความผิดพลาดของข้อมูลกำลังอัดดังกล่าวเกิดการสะสม จึงเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลขึ้น

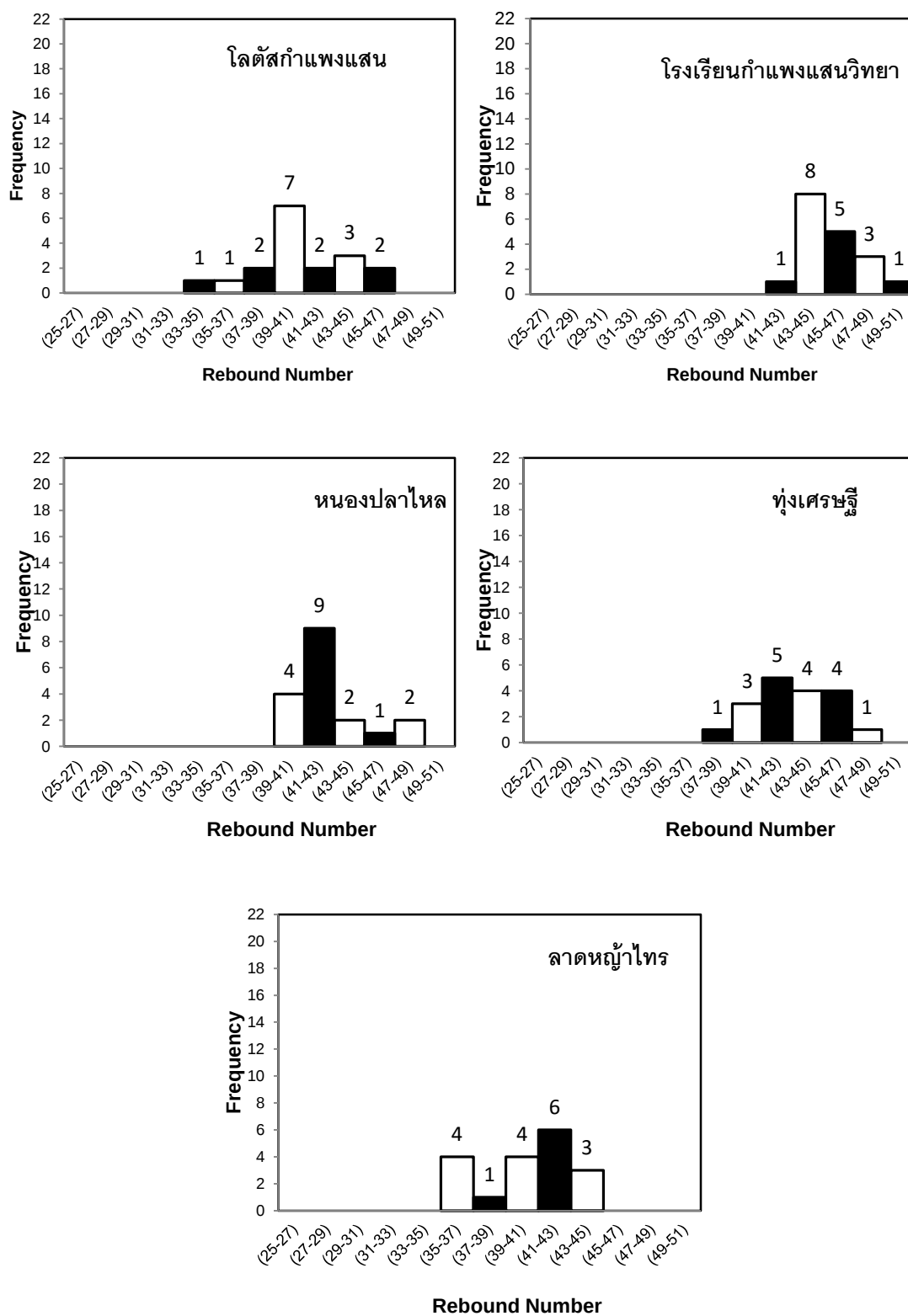
นอกจากนี้ยังพบอีกว่าคอนกรีตที่เกิดคาร์บอนขึ้นจะมีความพรุนน้อยลง เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาคาร์บอนขึ้นจะช่วยอุดช่องว่างส่วนหนึ่งในคอนกรีต ทำให้แนวโน้มของค่ากำลังอัดจาก Schmidt Hammer มีค่าเพิ่มมากขึ้น ตลอดจนคอนกรีตมีการพัฒนากำลังสูงขึ้นตามอายุการใช้งาน (คอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่เกิดการเสื่อมสภาพ) ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในอดีตของ Jin-Keun Kim [18] ในขณะเดียวกันจากตารางที่ 4.2 พบว่าค่ากำลังอัดจาก Schmidt Hammer ของสะพานลอยในอำเภอเมืองนครปฐม มีค่าต่ำกว่าในเขตอำเภอกำแพงแสนและนครชัยศรี ทั้งนี้อาจเกิดจากคุณสมบัติของคอนกรีตที่แตกต่างกัน เช่น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เป็นต้น รวมถึงค่าความผิดพลาดที่เกิดเนื่องจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลกำลังอัดที่กล่าวมาข้างต้น

แต่อย่างไรก็ตามในอนาคตข้างหน้าระยะคาร์บอนขึ้นจะเพิ่มขึ้นตามอายุการใช้งานจนถึงเหล็กเสริมภายในคอนกรีต มีผลทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมจนทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ ซึ่งอาจจะมีผลทำให้กำลังอัดลดน้อยลงแตกต่างกันไป

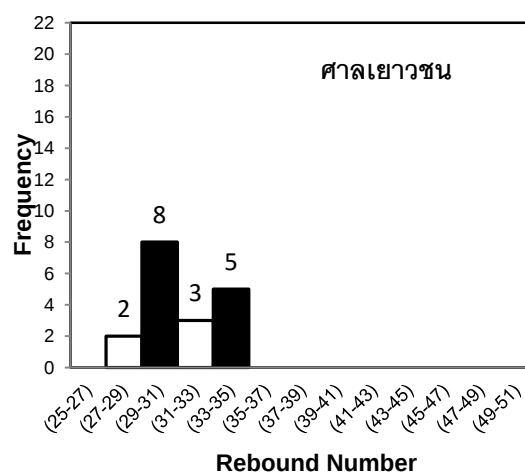
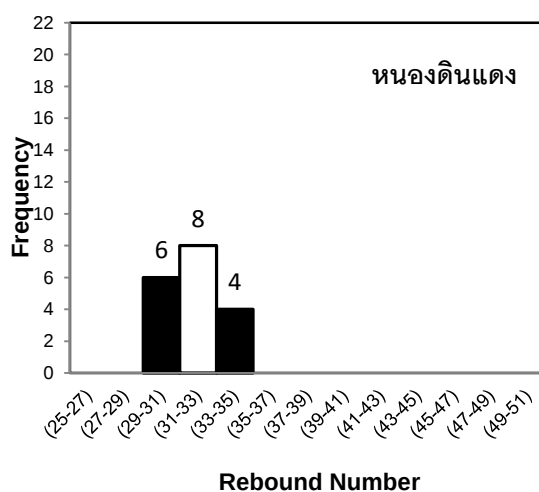
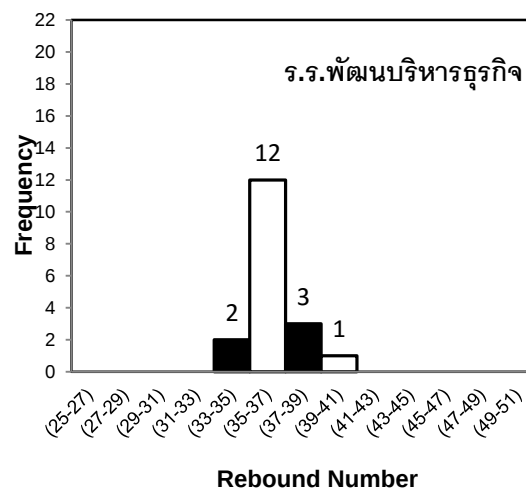
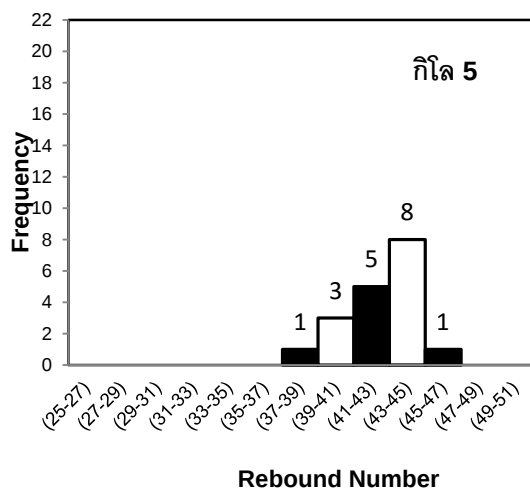
จากที่กล่าวมาข้างต้นค่าการสะท้อนจากค้อนกระแทกสามารถนำมาใช้ในการประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีต (กก./ซม.<sup>2</sup>) โดยอ้างอิงการประมาณค่าตามความสัมพันธ์ของ Japan Society of Civil Engineers (JSCE)

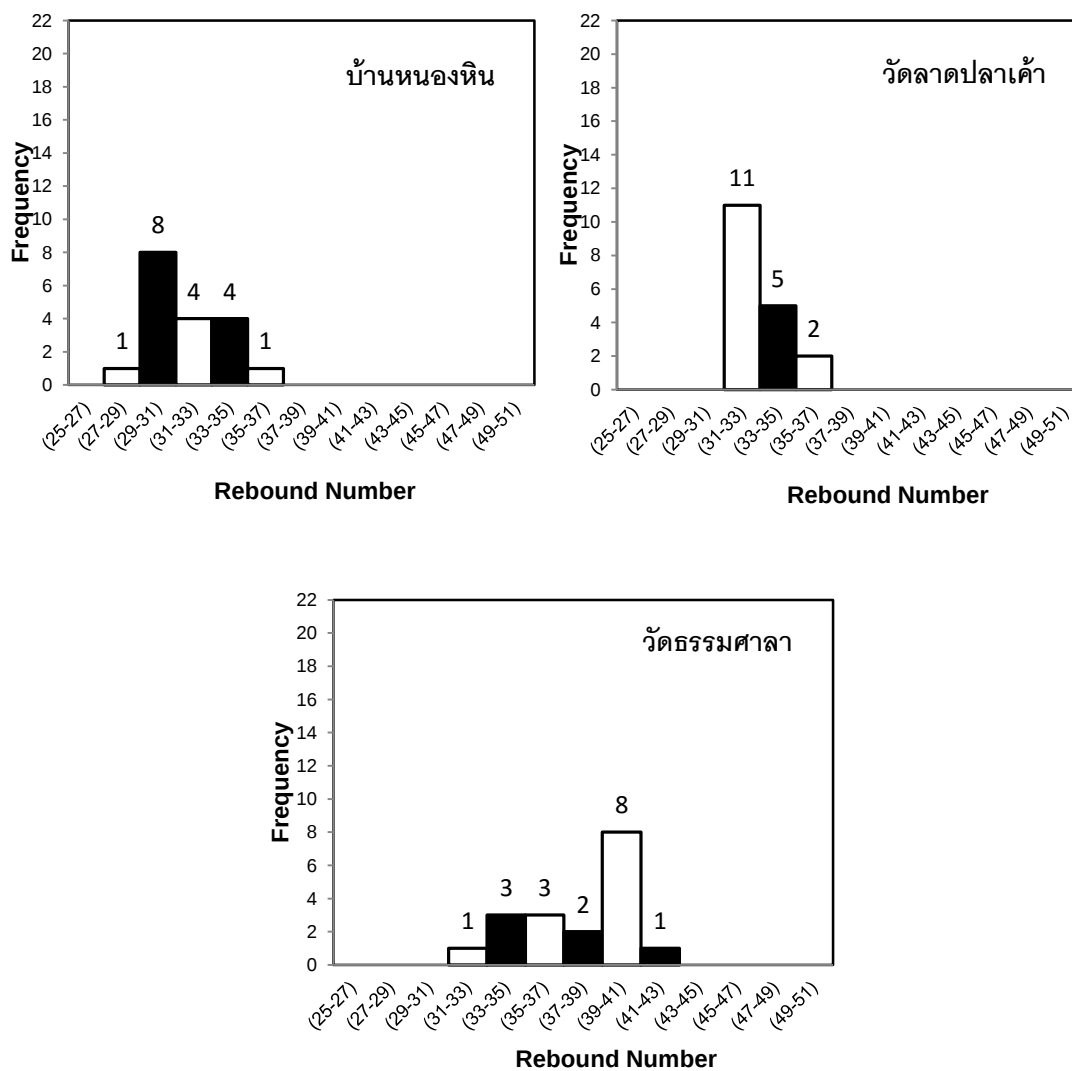
นอกจากนี้ยังสามารถนำค่าที่ได้จากกำลังอัด (JSCE) ไปหาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานได้ โดยอาศัยกราฟในภาคผนวก (รูปที่ ก) คือ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์แคลเซียมออกไซด์และกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ซึ่งแกน x ของกราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์แคลเซียมออกไซด์ในปริมาณต่างๆกัน แกน y ด้านซ้ายของกราฟแสดงค่ากำลังอัดที่ต่างๆกัน และแกน y ด้านขวาของกราฟแสดงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

สำหรับโครงการก่อสร้างสะพานลอยที่อยู่ในการควบคุมของกรมทางหลวง มีการใช้ปูนซีเมนต์ Portland ประเภทที่ 1 [36] ในการก่อสร้าง จึงทำให้เราสามารถทราบปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 63-68 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในการหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานครั้งนี้ใช้ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์เท่ากับ 65 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกำลังอัดก็หาได้จากความสัมพันธ์ของ (JSCE) จากนั้นก็เทียบเคียงหาจุดตัดของค่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่ 65 เปอร์เซ็นต์และค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ก็จะสามารถทราบค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานได้ดังตารางที่ 4.2

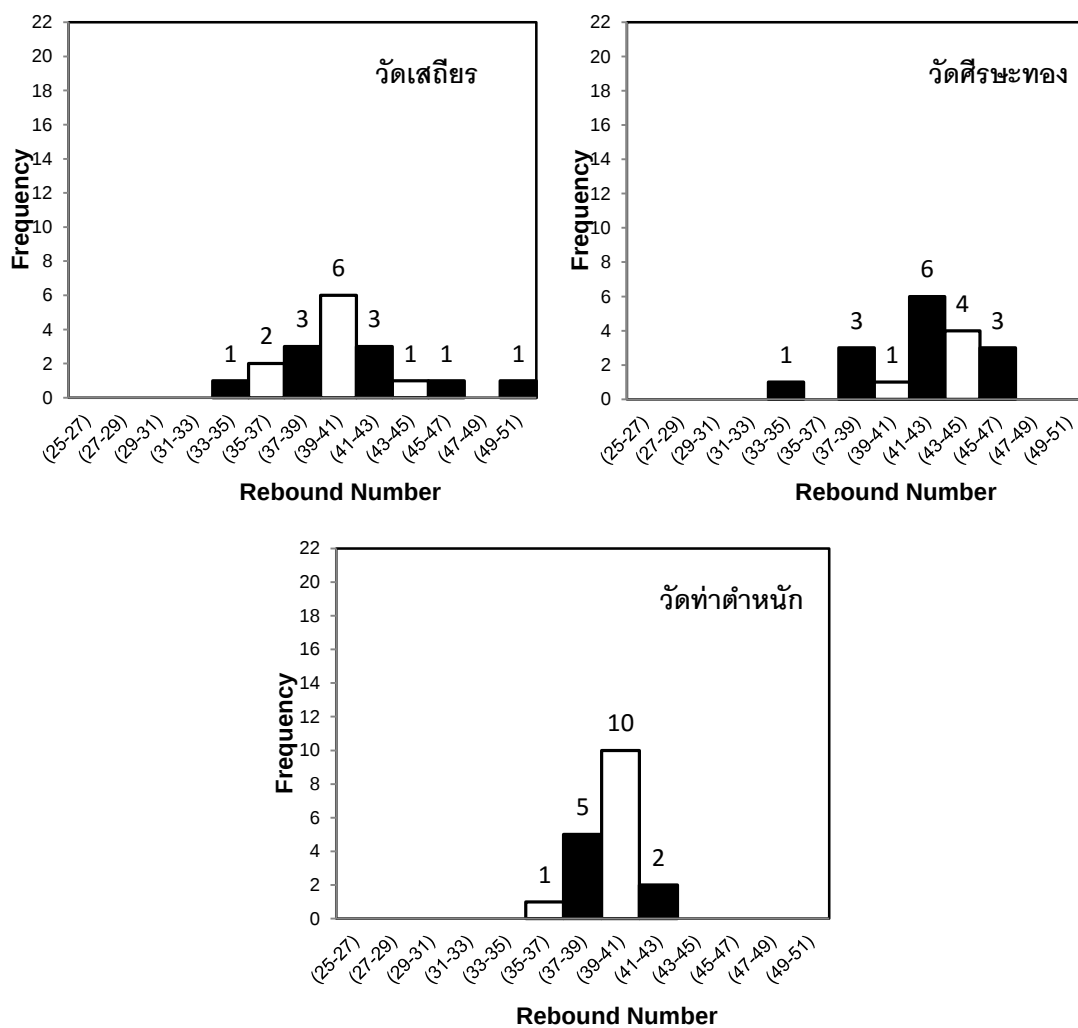


ภาพที่ 4.2 ค่าการกระจายตัวของการสะท้อนที่วัดได้จากสะพานลอยในพื้นที่อำเภอกำแพงแสน





ภาพที่ 4.3 ค่าการกระจายตัวของการสะท้อนที่วัดได้จากสะพานลอยในพื้นที่อำเภอเมือง



ภาพที่ 4.4 ค่าการกระจายตัวของการสะท้อนที่วัดได้จากสะพานลอยในพื้นที่อำเภอนครชัยศรี

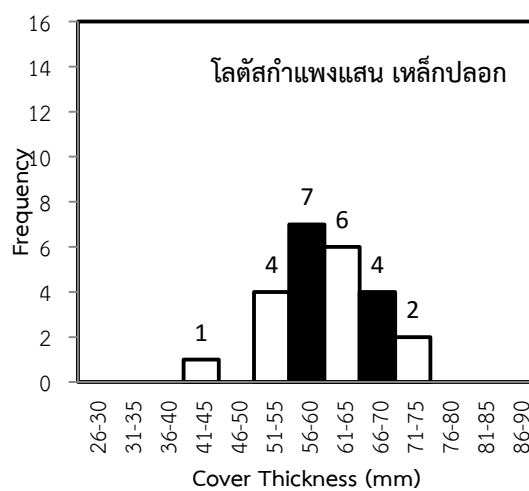
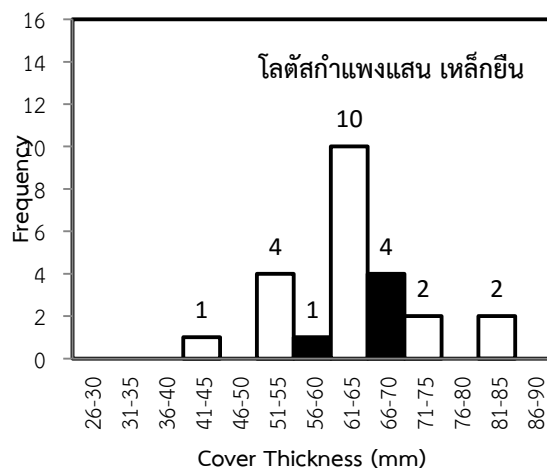
#### 4.4 การวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก

ในส่วนของผลการวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก ดังตารางที่ 4.3 พบว่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเฉลี่ยที่ได้มีค่ามากกว่า 43 มิลลิเมตรทุกโครงการ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยมากกว่าค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่กำหนดไว้ในมาตรฐานงานออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กของกรมทางหลวง คือ ต้องมีระยะหุ้มเหล็กที่ 30 มม. [36] แสดงให้เห็นว่าระบบการควบคุมการก่อสร้างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งจะสามารถช่วยชะลอคาร์บอนชั้นที่จะเข้าไปถึงตำแหน่งเหล็กเสริม จนทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมลดต่ำลงใกล้เคียงหรือต่ำกว่าระดับวิกฤติ

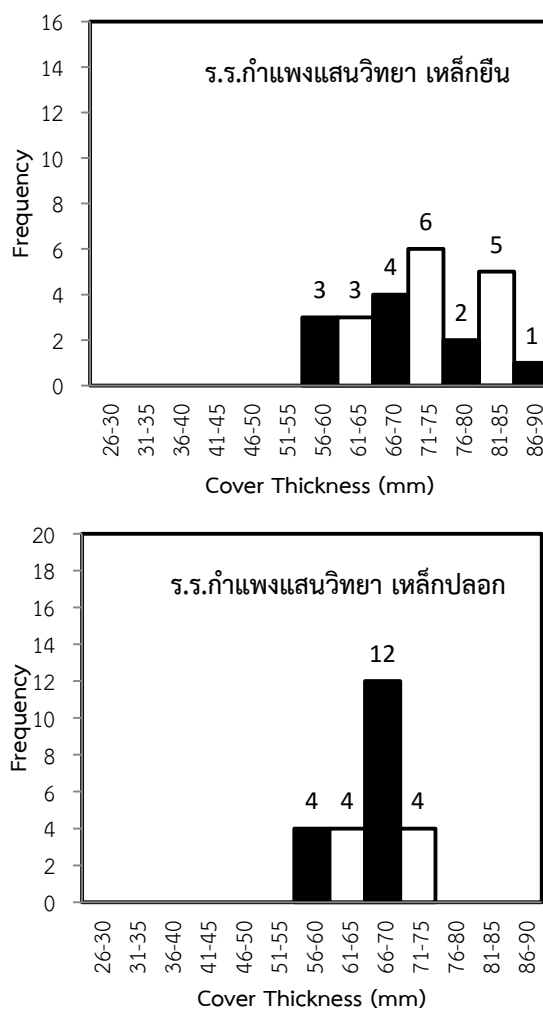
ตารางที่ 4.3 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเฉลี่ย

| โครงการ                           | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเฉลี่ย (มม.) |                              |               |                              |
|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------|------------------------------|
|                                   | เหล็กยื่น                        | ส่วน<br>เปี่ยงเบน<br>มาตรฐาน | เหล็ก<br>ปลูก | ส่วน<br>เปี่ยงเบน<br>มาตรฐาน |
| ก.ม.24+166 (โลตัสกำแพงแสน)        | 63.67                            | 9.17                         | 60.38         | 6.87                         |
| ก.ม.23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา)    | 71.54                            | 9.06                         | 66.71         | 4.66                         |
| ก.ม.19+235 (หนองปลาไหล)           | 64.71                            | 7.23                         | 61.38         | 7.35                         |
| ก.ม.17+835 (ทุ่งเศรษฐี)           | 53.79                            | 4.15                         | 45.75         | 3.19                         |
| ก.ม.15+760 (ลาดหญ้าไทร)           | 73.33                            | 8.80                         | 68.08         | 11.58                        |
| ก.ม.5+650 (กิโล 5)                | 48.13                            | 4.74                         | 43.58         | 3.22                         |
| ก.ม.66+780 (ร.ร.พัฒนบริหารธุรกิจ) | 54.00                            | 10.66                        | 49.42         | 9.25                         |
| ก.ม.64+075 (หนองดินแดง)           | 58.33                            | 11.81                        | 55.58         | 11.37                        |
| ก.ม.63+230 (ศาลยาวชน)             | 61.58                            | 9.67                         | 54.50         | 3.99                         |
| ก.ม.61+585 (บ้านหนองหิน)          | 51.46                            | 6.09                         | 47.21         | 6.37                         |
| ก.ม.59+785 (วัดลาดปลาเค้า)        | 51.96                            | 4.55                         | 44.46         | 6.75                         |
| ก.ม.50+174 (วัดธรรมศาลา)          | 75.13                            | 4.44                         | 69.38         | 7.87                         |
| ก.ม.47+485 (วัดเสถียร)            | 63.08                            | 3.61                         | 53.00         | 7.34                         |
| ก.ม.45+648 (วัดศิระทอง)           | 48.63                            | 4.78                         | 45.50         | 6.06                         |
| ก.ม.42+960 (วัดท่าตำหนัก)         | 60.96                            | 5.34                         | 50.75         | 4.45                         |

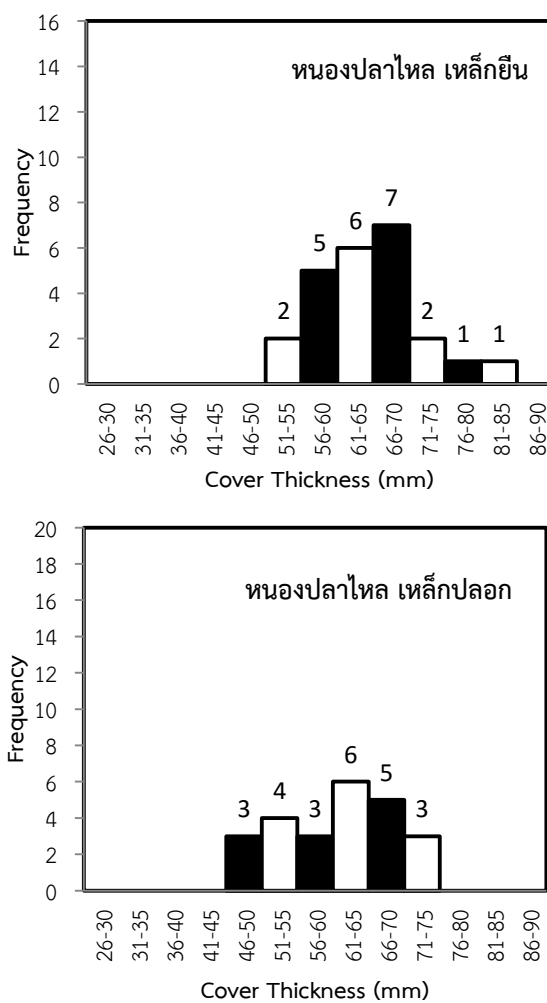
สำหรับในภาพที่ 4.5 ถึง 4.19 แสดงค่าการกระจายตัวคอนกรีตหุ้มเหล็กยื่นและเหล็กปลูกของสะพานลอย ก.ม.24+166 (โลตัสกำแพงแสน), ก.ม.23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา), ก.ม.19+235 (หนองปลาไหล), ก.ม.17+835 (ทุ่งเศรษฐี), ก.ม.15+760 (ลาดหญ้าไทร), ก.ม.5+650 (กิโล 5), ก.ม.66+780 (ร.ร.พัฒนบริหารธุรกิจ), ก.ม.64+075 (หนองดินแดง), ก.ม.63+230 (ศาลยาวชน), ก.ม.61+585 (บ้านหนองหิน), ก.ม.59+785 (วัดลาดปลาเค้า), ก.ม.50+174 (วัดธรรมศาลา), ก.ม.47+485 (วัดเสถียร), ก.ม.45+648 (วัดศิระทอง) และ ก.ม.42+960 (วัดท่าตำหนัก) ตามลำดับ ซึ่งมีการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) เช่นกัน



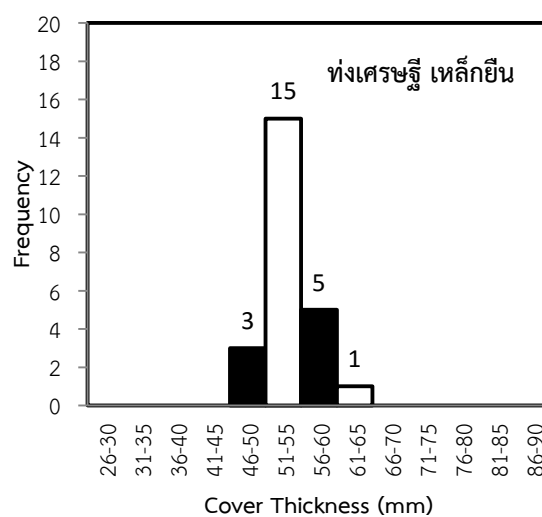
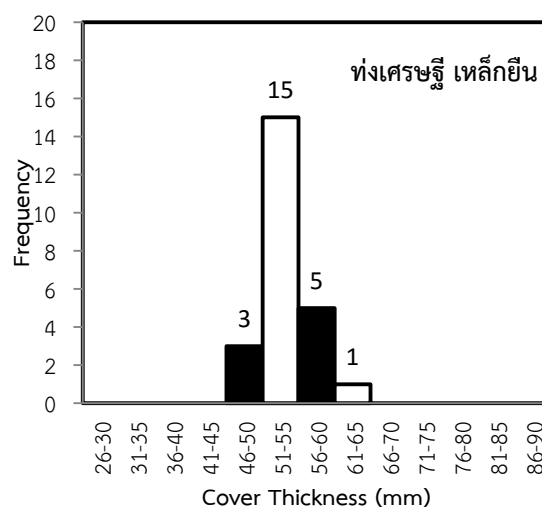
ภาพที่ 4.5 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กโครงการ ก.ม.24+166 (โลตัสกำแพงแสน)



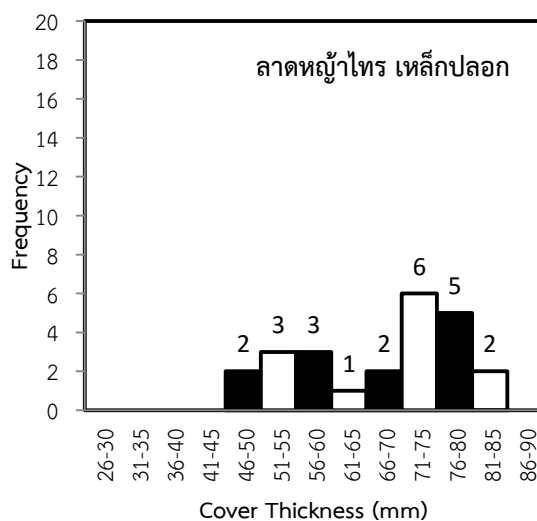
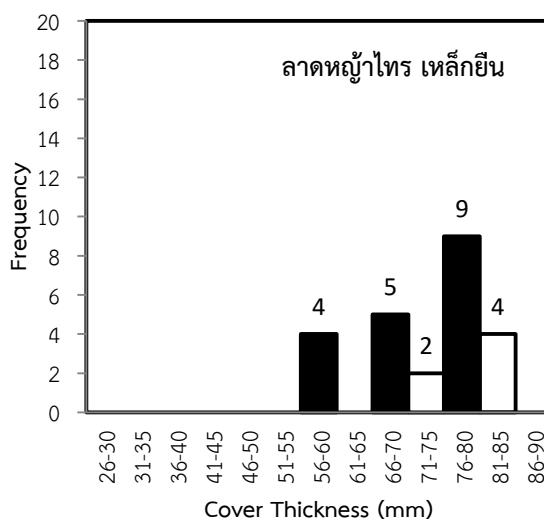
ภาพที่ 4.6 ค่าการกระจายตัวของคอนกรีตหุ้มเหล็กโครงการ ก.ม.23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา)



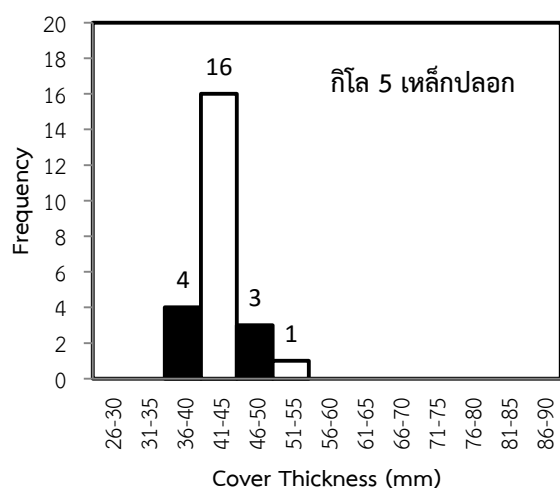
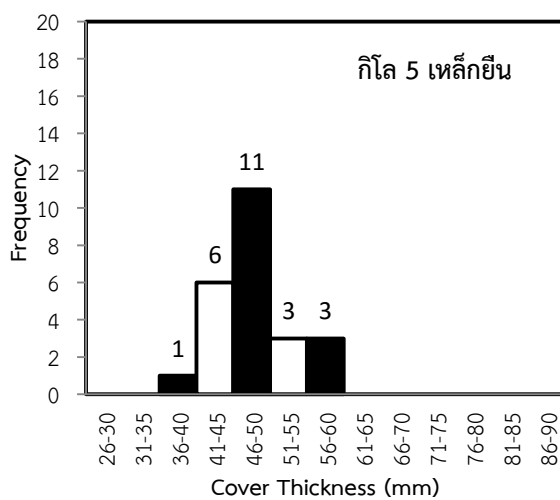
ภาพที่ 4.7 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กโครงการ ก.ม.19+235 (หนองปลาไหล)



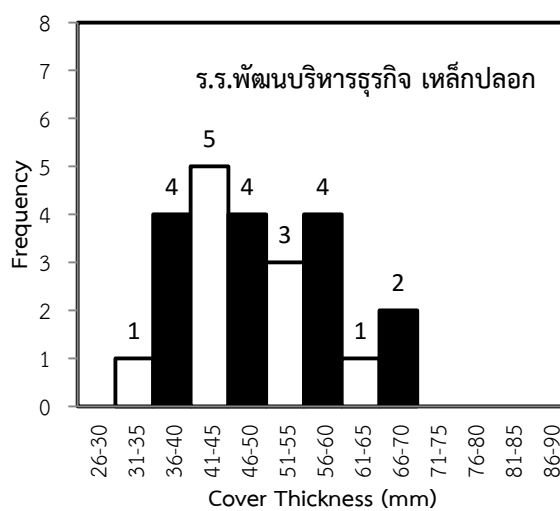
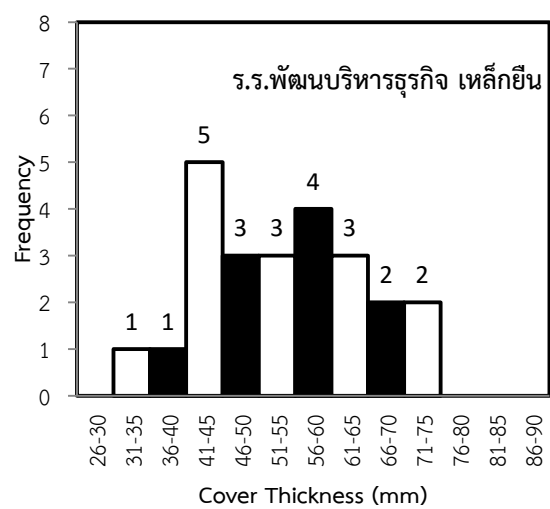
ภาพที่ 4.8 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กโครงการ ก.ม.17+835 (ทุ่งเศรษฐี)



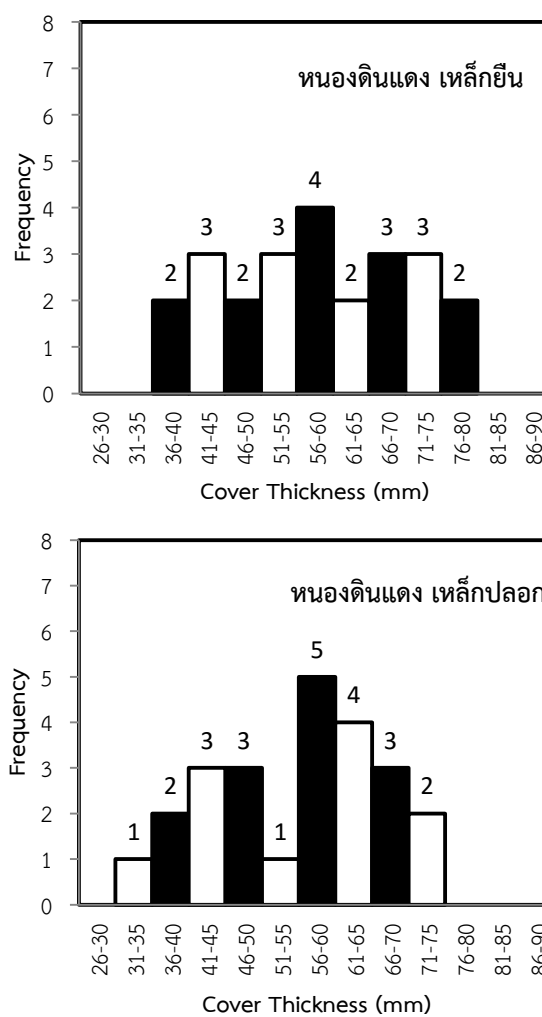
ภาพที่ 4.9 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กโครงการ ก.ม.15+760 (ลาดหญ้าไทร)



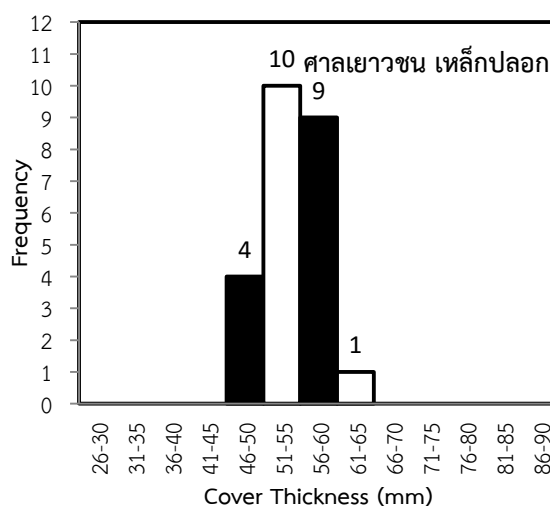
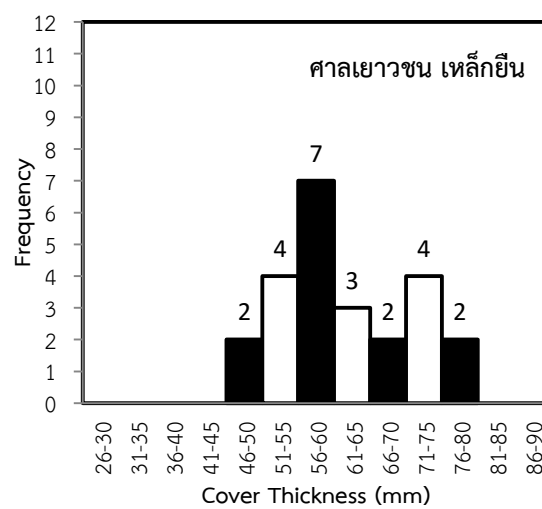
ภาพที่ 4.10 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กโครงการ ก.ม.5+650 (กิโล 5)



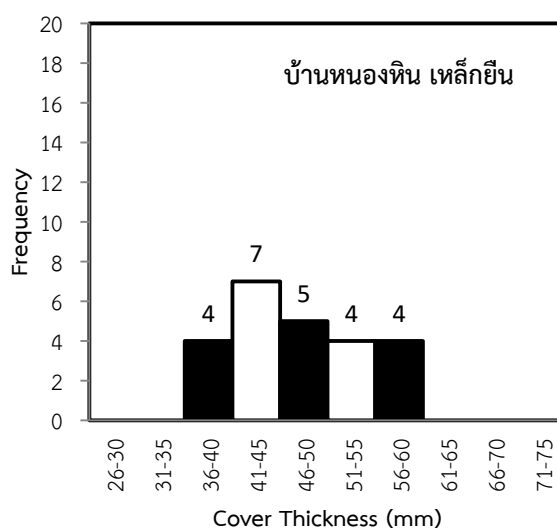
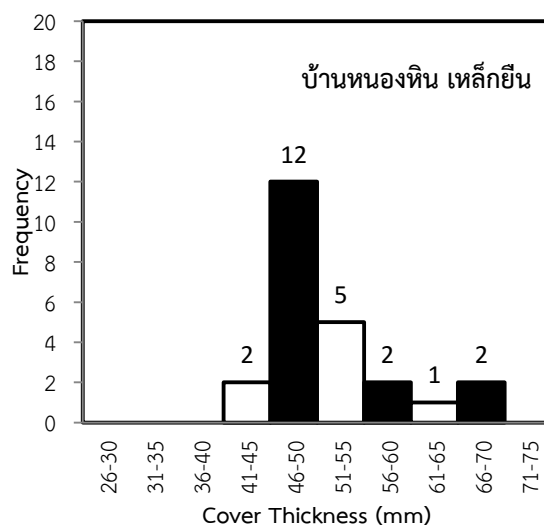
ภาพที่ 4.11 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กโครงการ ก.ม.66+780 (ร.ร.พัฒนบริหารธุรกิจ)



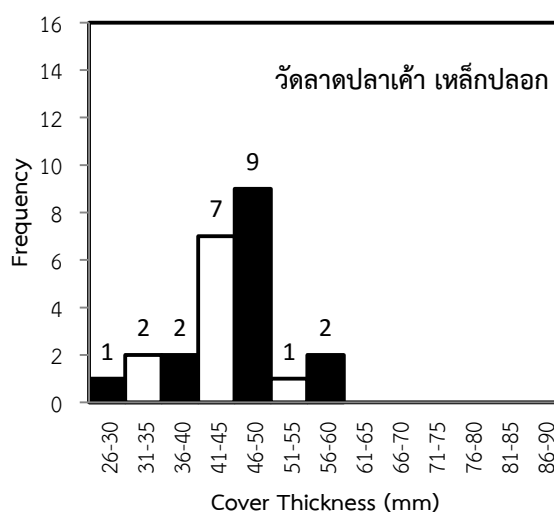
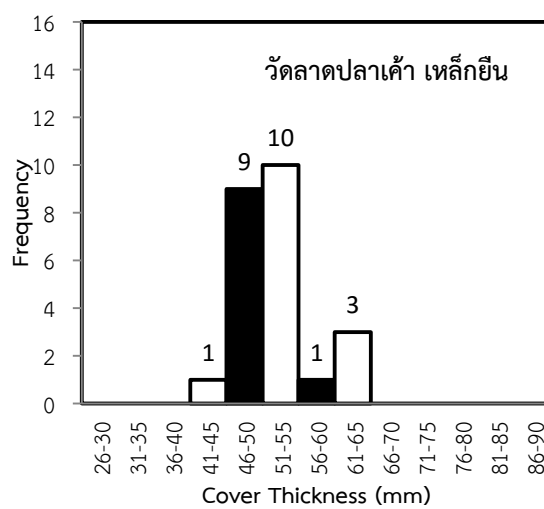
ภาพที่ 4.12 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กโครงการ ก.ม.64+075 (หนองดินแดง)



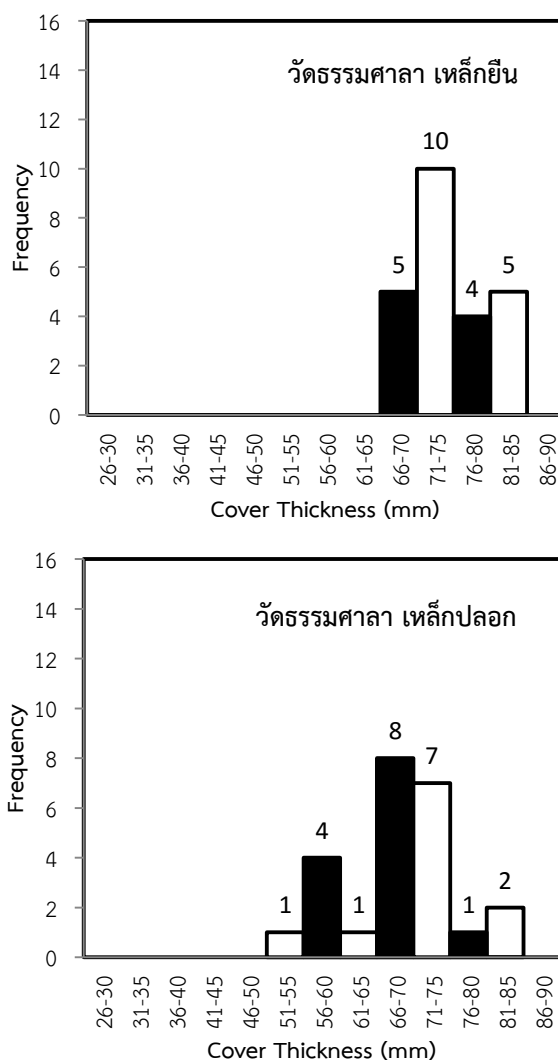
ภาพที่ 4.13 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กโครงการ ก.ม.63+230 (ฮาลยวชน)



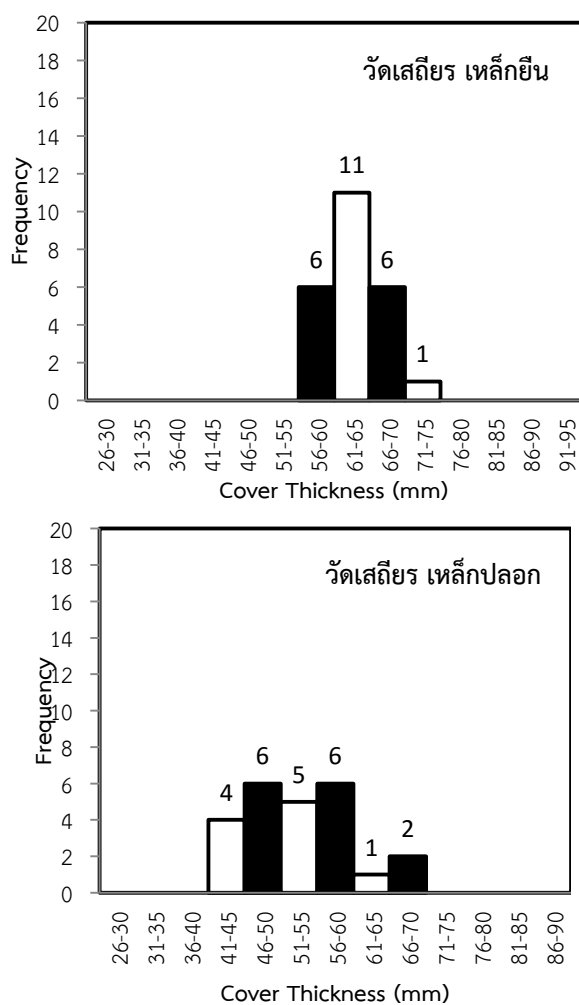
ภาพที่ 4.14 ค่าการกระจายตัวของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กโครงการ ก.ม.61+585 (บ้านหนองหิน)



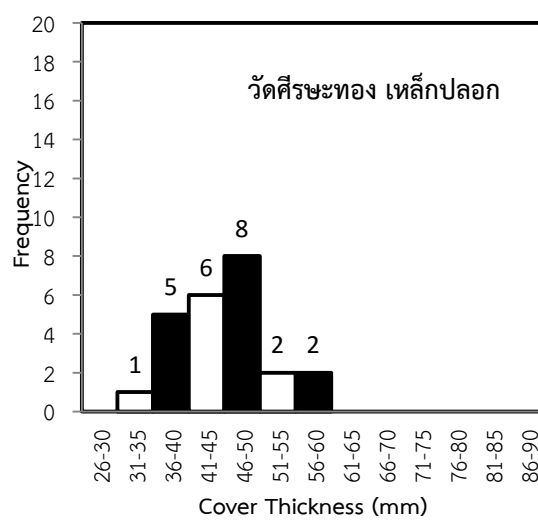
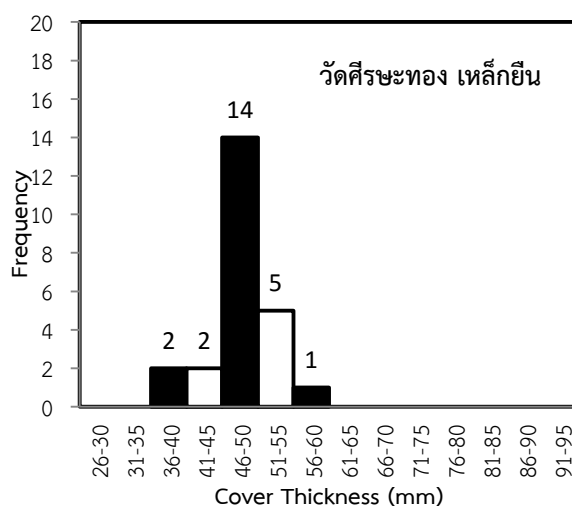
ภาพที่ 4.15 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กโครงการ ก.ม.59+785 (วัดลาดปลาเค้า)



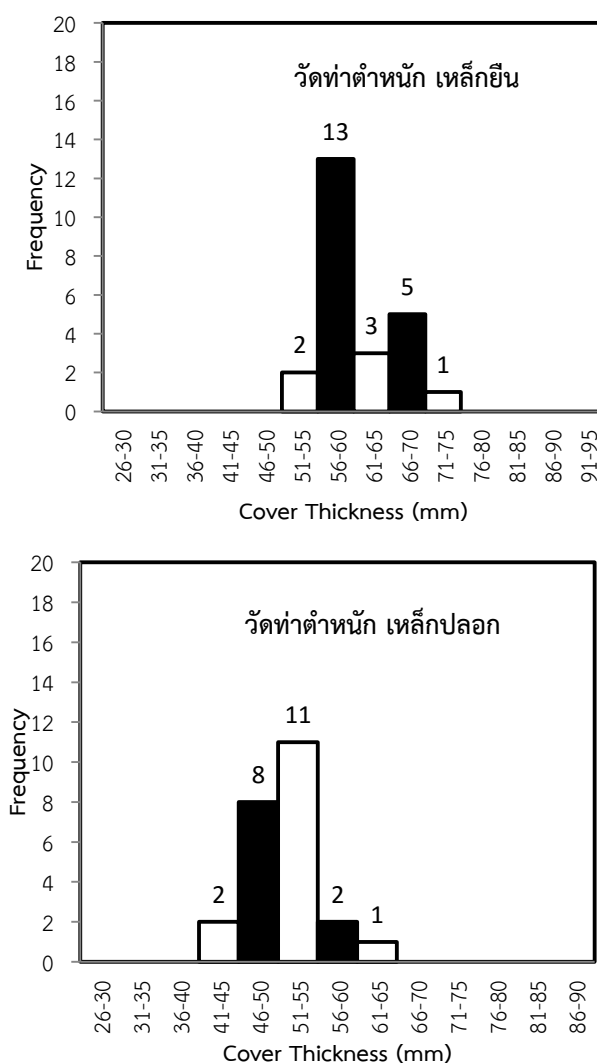
ภาพที่ 4.16 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กโครงการ ก.ม.50+174 (วัดธรรมศาลา)



ภาพที่ 4.17 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กโครงการ ก.ม.47+485 (วัดเสถียร)



ภาพที่ 4.18 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กโครงการ ก.ม.45+648 (วัดศีรษะทอง)



ภาพที่ 4.19 ค่าการกระจายตัวของคอนกรีตหุ้มเหล็กโครงการ ก.ม.42+960 (วัดทำดำหนัก)

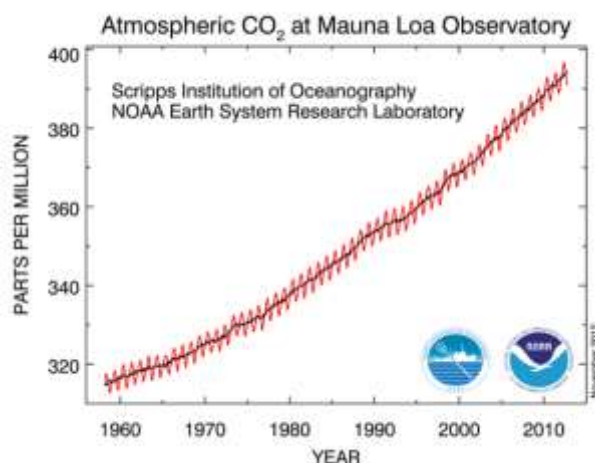
#### 4.5 ปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

ในส่วนของปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 เป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้การพัฒนาระยะคาร์บอนขึ้นเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แต่ในโดยภาพรวมแล้วความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในทุกๆ สะพานลอยมีความเข้มข้นที่สูงในระดับหนึ่ง เพราะโครงการที่เลือกในการศึกษาครั้งนี้มีภาวะความเสี่ยงต่อการเกิดระยะคาร์บอนขึ้นที่ชัดเจนอยู่แล้ว

ในส่วนของความชื้นสัมพัทธ์พบว่ามีความแปรผันของความชื้นสัมพัทธ์มีค่าแตกต่างกัน โดยความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่มีค่าอยู่ระหว่างกึ่งชื้นกึ่งแห้ง (Semi-Dry) คือ ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึงร้อยละ 60 จะเป็นปัจจัยที่ทำให้คอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความคงทนเกี่ยวกับคาร์บอนขึ้นได้เร็วขึ้น

เมื่อพิจารณาสะพานลอยหนองดินแดง (ก.ม.64+075), ศาลยาวชน (ก.ม.63+230), โรงเรียนกำแพงแสนวิทยา (ก.ม.23+325) และหนองปลาไหล (ก.ม.19+235) ซึ่งเป็นสะพานลอยที่มีคุณสมบัติ

ของคอนกรีตและอายุโครงสร้างที่ใกล้เคียงกัน พบว่าสะพานลอยหนองดินแดง และศาลเยาวชน มีอัตราการพัฒนาระยะคาร์บอนขึ้นมากกว่าสะพานลอยโรงเรียนกำแพงแสนวิทยาและหนองปลาไหล ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอยู่ในอากาศมีปริมาณที่สูงจึงเป็นภาวะปัจจัยส่วนหนึ่งที่ทำให้การพัฒนาระยะคาร์บอนขึ้นสูงกว่าสะพานลอยโรงเรียนกำแพงแสนวิทยาและหนองปลาไหล



ภาพที่ 4.20 กราฟแสดงปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปี [37]

แต่อย่างไรก็ตามปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอดีตจนถึงปัจจุบันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปีดังแสดงในภาพที่ 4.20 แต่ในตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมของข้อมูลในช่วงเวลาหนึ่งที่ทำการศึกษาเท่านั้น (พ.ศ.2558) ซึ่งในอนาคตข้อมูลความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ สมควรที่จะศึกษาในอนาคตต่อไป

ตารางที่ 4.4 ปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ของ  
สิ่งแวดล้อม

| โครงการที่เข้าตรวจสอบ             | อายุ<br>(เดือน) | ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์               |                                   | ความชื้นสัมพัทธ์ |                                       |
|-----------------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------|---------------------------------------|
|                                   |                 | ความ<br>เข้มข้น<br>เฉลี่ย<br>(ppm) | ส่วนเบี่ยงเบน<br>มาตรฐาน<br>(ppm) | ร้อยละเฉลี่ย     | ส่วน<br>เบี่ยงเบน<br>มาตรฐาน<br>(มม.) |
| ก.ม.24+166 (โลตส์กำแพงแสน)        | 183             | 670.19                             | 12.01                             | 37.05            | 12.79                                 |
| ก.ม.23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา)    | 183             | 657.18                             | 10.95                             | 47.97            | 1.68                                  |
| ก.ม.19+235 (หนองปลาไหล)           | 183             | 661.72                             | 10.38                             | 44.20            | 8.90                                  |
| ก.ม.17+835 (ทุ่งเศรษฐี)           | 183             | 668.56                             | 11.55                             | 43.92            | 7.89                                  |
| ก.ม.15+760 (ลาดหญ้าไทร)           | 183             | 658.11                             | 9.32                              | 48.68            | 3.25                                  |
| ก.ม.5+650 (กิโล 5)                | 183             | 669.36                             | 10.11                             | 53.84            | 1.11                                  |
| ก.ม.66+780 (ร.ร.พัฒนบริหารธุรกิจ) | 180             | 663.70                             | 9.93                              | 41.03            | 14.35                                 |
| ก.ม.64+075 (หนองดินแดง)           | 194             | 675.83                             | 11.25                             | 33.80            | 9.41                                  |
| ก.ม.63+230 (ศาลยาวชน)             | 167             | 690.85                             | 7.21                              | 34.95            | 8.69                                  |
| ก.ม.61+585 (บ้านหนองหิน)          | 269             | 696.15                             | 6.21                              | 40.14            | 12.62                                 |
| ก.ม.59+785 (วัดลาดปลาเค้า)        | 142             | 692.75                             | 7.67                              | 40.60            | 12.56                                 |
| ก.ม.50+174 (วัดธรรมศาลา)          | 207             | 697.16                             | 4.85                              | 51.77            | 7.19                                  |
| ก.ม.47+485 (วัดเสถียร)            | 171             | 695.17                             | 6.40                              | 46.45            | 10.71                                 |
| ก.ม.45+648 (วัดศิระทอง)           | 207             | 675.77                             | 11.32                             | 43.84            | 12.14                                 |
| ก.ม.42+960 (วัดท่าตำหนัก)         | 269             | 673.51                             | 7.12                              | 45.58            | 11.10                                 |

#### 4.6 ระยะเวลาบ่อนชั้น

จากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.21 แสดงผลระยะบ่อนชั้นเฉลี่ยของโครงการที่ตรวจสอบพบว่าระยะบ่อนชั้นเฉลี่ยมีค่าอยู่ระหว่าง 14-60 มม.

จากอายุของโครงสร้างและระยะบ่อนชั้น สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์บ่อนชั้นได้จากสมการที่ (4.2)

$$d = k\sqrt{t} \quad (4.2)$$

โดยที่ d คือค่าระยะบ่อนชั้น (มม.)

t คืออายุของโครงสร้าง(เดือน)

k คือค่าสัมประสิทธิ์บ่อนชั้น ( มม/ เดือน<sup>1/2</sup> )

ตารางที่ 4.5 แสดงผลระยะบ่อนชั้นเฉลี่ยของโครงสร้างสะพานลอยทั้ง 15 สะพานลอย ส่วนภาพที่ 4.21 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะบ่อนชั้นและรากที่สองของอายุของโครงสร้างของสะพานดังกล่าว จากการทดสอบพบว่าระยะบ่อนชั้นเฉลี่ยของโครงสร้างสะพานลอยที่ได้ศึกษาในครั้งนี้ มีค่าอยู่ระหว่าง 14-60 มม. โดยสะพานลอยที่มีสถานที่ตั้งอยู่ในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีแนวโน้มของระยะบ่อนชั้นที่มากกว่าสะพานลอยที่ตั้งอยู่ในเขตปริมณฑลอื่น ทั้งนี้เนื่องจาก

1) สภาพอายุการใช้งานที่ต่างกัน คือโครงสร้างสะพานลอยในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีแนวโน้มการก่อสร้างก่อนโครงสร้างสะพานลอยในเขตปริมณฑลอื่น

2) สภาพแวดล้อมที่ต่างกันคือในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีสถานที่ตั้งติดกับศูนย์การค้า เป็นแหล่งชุมชน ปริมาณการจราจรมาก ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าในเขตปริมณฑลอื่น

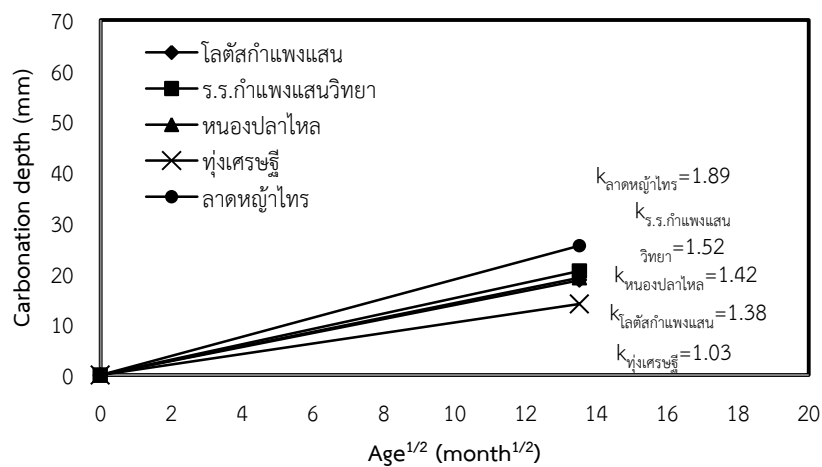
3) คุณภาพของคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างของแต่ละพื้นที่อาจจะมีส่วนที่ต่างกัน

จากผลการทดสอบโครงสร้างสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์บ่อนชั้น (k) ได้ค่าดังตารางที่ 4.5 และได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะบ่อนชั้นและอายุของสะพานลอยดังภาพที่ 4.21ก, ข, ค ซึ่งพบว่าโครงสร้างสะพานลอยที่อยู่ในเขตอำเภอเมืองนครปฐม เช่น สะพานลอยหนองดินแดงมีค่าสัมประสิทธิ์บ่อนชั้นสูงกว่าสะพานลอยที่อยู่ในเขตปริมณฑลอื่น เช่น สะพานลอยโลตัสกำแพงแสน เป็นต้น

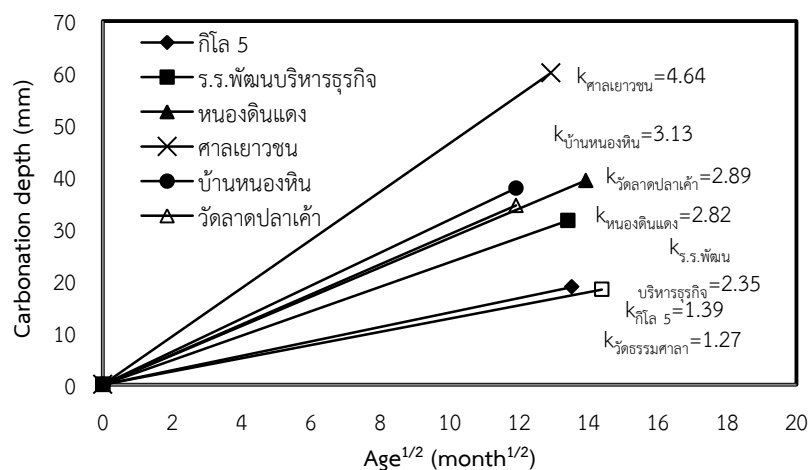
ภาพที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์บ่อนชั้นกับกำลังอัดของโครงสร้างสะพานลอย พบว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง จะมีค่าสัมประสิทธิ์บ่อนชั้นต่ำกว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดน้อยกว่า

ตารางที่ 4.5 ผลระยะคาร์บอนชั้นเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น

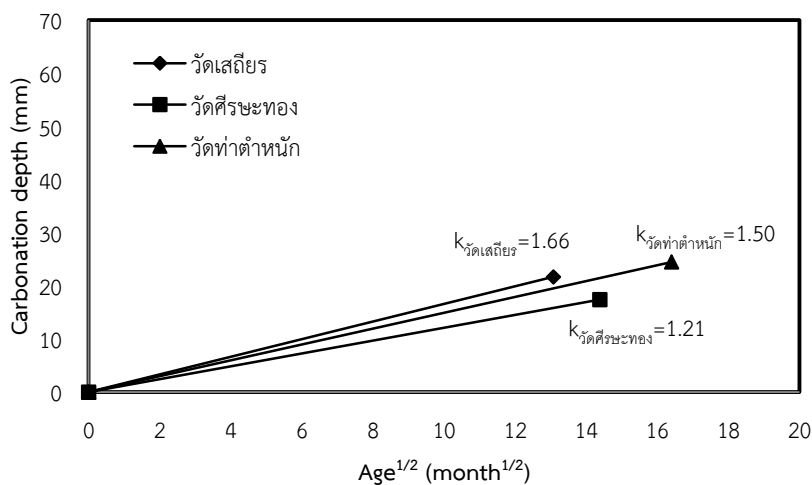
| โครงสร้างสะพานลอยที่เข้าตรวจสอบ   | สถานที่ตั้ง<br>(อำเภอ) | ระยะคาร์บอนชั้น         |                                   | สัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น (K)             |                                                         |
|-----------------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|                                   |                        | ระยะ<br>เฉลี่ย<br>(มม.) | ส่วนเบี่ยงเบน<br>มาตรฐาน<br>(มม.) | K เฉลี่ย<br>(มม./เดือน <sup>1/2</sup> ) | ส่วนเบี่ยงเบน<br>มาตรฐาน<br>(มม./เดือน <sup>1/2</sup> ) |
| ก.ม.24+166 (โลตส์กำแพงแสน)        | กำแพงแสน               | 18.70                   | 1.47                              | 1.38                                    | 0.11                                                    |
| ก.ม.23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา)    | กำแพงแสน               | 20.50                   | 3.50                              | 1.52                                    | 0.26                                                    |
| ก.ม.19+235 (หนองปลาไหล)           | กำแพงแสน               | 19.20                   | 1.45                              | 1.42                                    | 0.11                                                    |
| ก.ม.17+835 (ทุ่งเศรษฐี)           | กำแพงแสน               | 14.00                   | 2.99                              | 1.03                                    | 0.22                                                    |
| ก.ม.15+760 (ลาดหญ้าไทร)           | กำแพงแสน               | 25.50                   | 6.49                              | 1.89                                    | 0.48                                                    |
| ก.ม.5+650 (กิโล 5)                | เมือง                  | 18.80                   | 3.00                              | 1.39                                    | 0.22                                                    |
| ก.ม.66+780 (ร.ร.พัฒนบริหารธุรกิจ) | เมือง                  | 31.60                   | 2.00                              | 2.35                                    | 0.15                                                    |
| ก.ม.64+075 (หนองดินแดง)           | เมือง                  | 39.30                   | 4.31                              | 2.82                                    | 0.31                                                    |
| ก.ม.63+230 (ศาลยาวชน)             | เมือง                  | 60.00                   | 0.48                              | 4.64                                    | 0.04                                                    |
| ก.ม.61+585 (บ้านหนองหิน)          | เมือง                  | 37.80                   | 1.04                              | 3.17                                    | 0.09                                                    |
| ก.ม.59+785 (วัดลาดปลาเค้า)        | เมือง                  | 34.50                   | 4.82                              | 2.89                                    | 0.40                                                    |
| ก.ม.50+174 (วัดธรรมศาลา)          | เมือง                  | 18.30                   | 1.14                              | 1.27                                    | 0.08                                                    |
| ก.ม.47+485 (วัดเสถียร)            | นครชัยศรี              | 21.70                   | 4.38                              | 1.66                                    | 0.33                                                    |
| ก.ม.45+648 (วัดศิระทอง)           | นครชัยศรี              | 17.40                   | 1.07                              | 1.21                                    | 0.07                                                    |
| ก.ม.42+960 (วัดท่าตำหนัก)         | นครชัยศรี              | 24.50                   | 4.60                              | 1.50                                    | 0.28                                                    |



(ก) โครงสร้างสะพานลอยอำเภอกำแพงแสน

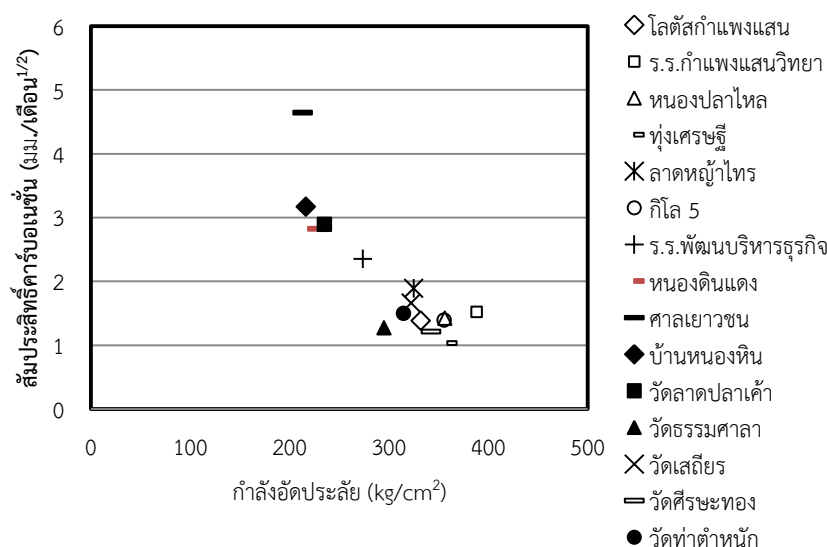


(ข) โครงสร้างสะพานลอยอำเภอเมือง



(ค) โครงสร้างสะพานลอยอำเภอนครชัยศรี

ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะคาร์บอนเนชั่นและอายุของโครงสร้างสะพานลอย  
จังหวัดนครปฐม



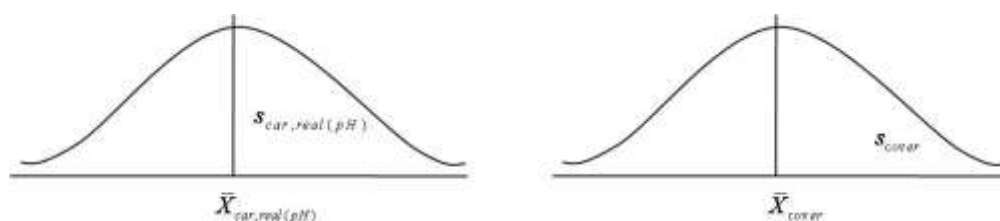
ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเข้มข้นกับกำลังอัดของโครงสร้างสะพานลอย

#### 4.7 การประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเข้มข้นของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

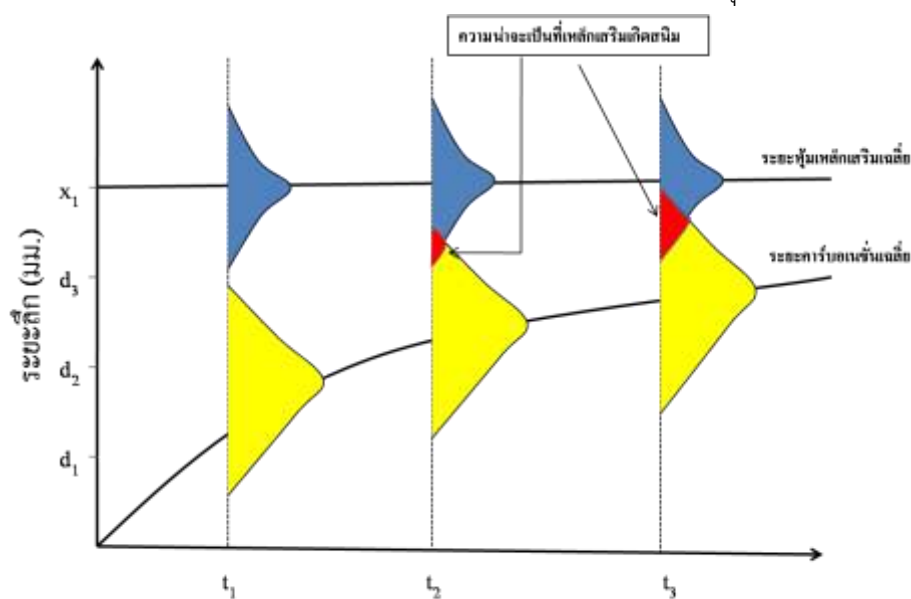
การประเมินความเสี่ยง (Risk Assessment) หมายถึง การจำแนกและพิจารณาจัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยงที่มีอยู่ โดยการประเมินจากโอกาสที่เกิด (Likelihood) และผลกระทบ (Impact)

- โอกาสที่เกิด (Likelihood) เป็นการพิจารณาความเป็นไปได้ที่จะเกิดเหตุการณ์ความเสี่ยงในช่วงเวลาหนึ่ง หรือจะเรียกว่าความถี่ หรือโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ความเสี่ยงก็ได้
- ผลกระทบ (Impact) ระดับความรุนแรงของผลเสียหายที่เกิดขึ้นจากความเสี่ยงและมีผลกระทบต่อโครงสร้าง ซึ่งอาจทำให้โครงสร้างนั้นๆเกิดความเสียหาย

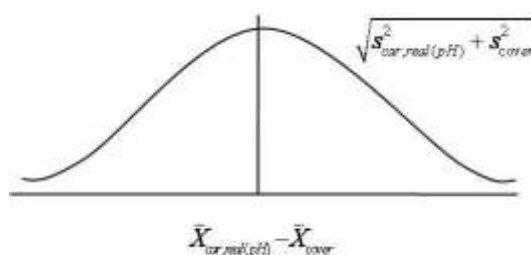
จากภาพที่ 4.23(ก) แสดงแบบจำลองโค้งงอปกติของระยะคาร์บอนเข้มข้นและระยะหุ้มเหล็กเสริม ซึ่งข้อมูลทั้งสองเป็นอิสระต่อกัน จากนั้นเมื่ออายุโครงสร้างมากขึ้นความสัมพันธ์ของโค้งงอปกติของระยะคาร์บอนเข้มข้นจะซ้อนทับโค้งงอปกติของระยะหุ้มเหล็กเสริม ทำให้โค้งงอปกติของข้อมูลทั้งสองเกิดส่วนที่ซ้อนทับกันขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.23(ข) ซึ่งเป็นการแสดงแบบจำลองความเสี่ยงที่เหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีโอกาสเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเข้มข้นโดยการแปรผันตามอายุของโครงสร้าง ซึ่งภาพดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ความน่าจะเป็นของระยะหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ย  $x_1$  จะมีค่าคงที่ตลอดอายุการใช้งาน ในขณะที่พื้นที่ความน่าจะเป็นของระยะคาร์บอนเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นทุกช่วงอายุการใช้งานจาก  $d_1$  ไป  $d_2$  หรือ  $d_3$  เป็นต้น จนกระทั่ง ณ ช่วงอายุหนึ่งของโครงสร้าง ความน่าจะเป็นของระยะคาร์บอนเข้มข้นจะซ้อนทับกับความน่าจะเป็นของระยะหุ้มเหล็กเสริม ซึ่งส่วนที่ซ้อนทับก็คือความเสี่ยงที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเข้มข้น จากการซ้อนทับของระยะหุ้มเหล็กเสริมและระยะคาร์บอนเข้มข้นทำให้เกิดค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตัวใหม่ของข้อมูลระยะคาร์บอนเข้มข้นและระยะหุ้มเหล็กเสริม ซึ่งแสดงออกมาในภาพที่ 4.23(ค)



(ก) แผนภาพจำลองโค้งปกติของระยะคาร์บอนชั้นและระยะหุ้มเหล็กเสริม



(ข) แผนภาพจำลองความเสี่ยงของระยะคาร์บอนชั้นและระยะหุ้มเหล็กเสริมที่มีการแปรผันตามอายุโครงสร้าง [38]



(ค) แผนภาพจำลองโค้งปกติที่เกิดจากการซ้อนทับของระยะคาร์บอนชั้นและระยะหุ้มเหล็กเสริม  
ภาพที่ 4.23 แผนภาพแสดงกลไกความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นตามหลักความน่าจะเป็นทางสถิติ

จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 และ 4.5 สามารถทำการวิเคราะห์ความเสี่ยงที่เหล็กเสริมจะมีโอกาสเกิดสนิมตามอายุต่างๆของโครงสร้างได้โดยประยุกต์หลักทางสถิติเกี่ยวกับการแจกแจงความน่าจะเป็นต่อเนื่องของผู้แต่งจากคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [39] เข้ามาทำการวิเคราะห์ ตามแบบจำลองภาพที่ 4.23 (ก), (ข), (ค) อาศัยความสัมพันธ์ของการแจกแจงของผลต่างค่าเฉลี่ยของระยะหุ้มเหล็กเสริมและระยะคาร์บอนชั้น โดยระยะคาร์บอนชั้นที่จะนำมาสร้างความสัมพันธ์วิเคราะห์ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นจะมีการบวกระยะเพิ่มเข้าไป 10 มิลลิเมตรทุกระยะคาร์บอนชั้นที่วัดได้จากโครงสร้างตามมาตรฐาน JSCE [35] ที่ระบุไว้ว่าระยะคาร์บอนชั้นที่วัดจากโครงสร้างโดยการฉีดสารละลายฟีนอล์ฟธาไลน์ไปยังตัวอย่างคอนกรีตนั้น สารละลายฟีนอล์ฟธาไลน์จะมีการเปลี่ยนสีที่ค่า pH ประมาณ 9.2 แต่ในทางทฤษฎีพบว่าโอกาสที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิมจะมีค่ามากกว่าค่า pH ที่ 9.2 ซึ่งอยู่ระหว่างค่า pH ที่ 9.2-13 ดังนั้นมาตรฐาน JSCE จึงมีการบวกระยะคาร์บอนชั้นเพิ่มไปอีก 10 มิลลิเมตร เพื่อความปลอดภัยของโครงสร้าง ดังสมการที่ (4.4) สำหรับสมการที่ (4.3) คือสมการพื้นฐานของการหาระยะคาร์บอนชั้น

$$x_{car,real} = k\sqrt{t_0} \quad (4.3)$$

$$k\sqrt{t} + 10 = x_{car,real(pH)} \quad (4.4)$$

|        |                    |                                                                   |
|--------|--------------------|-------------------------------------------------------------------|
| โดยที่ | $x_{car,real}$     | คือระยะคาร์บอนชั้นที่วัดได้จากโครงสร้าง ณ อายุที่ทำการทดสอบ (มม.) |
|        | $x_{car,real(pH)}$ | คือระยะคาร์บอนชั้นที่มีการบวกเพิ่ม 10 มม.ตามมาตรฐาน JSCE          |
|        | $k$                | คือค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น ( มม./ เดือน <sup>1/2</sup> )       |
|        | $t_0$              | คืออายุของโครงสร้าง ณ เวลาที่ทำการทดสอบระยะคาร์บอนชั้น (เดือน)    |
|        | $t$                | คืออายุของโครงสร้างที่ต้องการวิเคราะห์ (เดือน)                    |

อย่างไรก็ตามจากสมการที่ (4.3) เป็นการคำนวณหาระยะคาร์บอนชั้น ณ อายุที่ทำการทดสอบเท่านั้น ในกรณีที่หาระยะคาร์บอนชั้นที่มีการแปรผันตามอายุโครงสร้าง จะต้องมีการเปลี่ยนค่า  $t$  ในสมการที่ (4.4) เป็น  $t_{1,2,...,n}$  โดย 1,2,...,n คืออายุโครงสร้างที่มีการแปรผันตามเวลาที่ต้องการพิจารณา

จากแผนภาพจำลองความเสี่ยงที่เหล็กเสริมเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นดังแสดงในภาพที่ 4.23(ก), (ข), (ค) ต้องมีการหาตัวแปรที่จะนำไปวิเคราะห์ตามหลักสถิติเพื่อหาความเสี่ยงที่เหล็กเสริมเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น ประกอบด้วย 1) ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะหุ้มเหล็กเสริม โดยสมมุติให้ค่าทั้งสองค่าดังกล่าวคงที่ตลอดอายุการใช้งาน 2) ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะคาร์บอนชั้นจะมีการวิเคราะห์ค่าดังกล่าวแตกต่างกันคือ ให้ค่าเฉลี่ยของระยะคาร์บอนชั้นจะมีการแปรผันตามเวลาของอายุโครงสร้าง สำหรับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะคาร์บอนชั้นเฉลี่ยจะสมมุติให้คงที่ตลอดอายุการใช้งาน หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรสุ่มปกติมาตรฐานของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นโดยอาศัยสมการที่ (4.5) ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นผลของ

ช่วงอายุใดอายุหนึ่งของโครงสร้างเท่านั้น เพราะฉะนั้นถ้าต้องการให้ตัวแปรสุ่มปกติมาตรฐานอายุโครงสร้างที่มีการแปรผันไปตามเวลา จึงจำเป็นต้องอาศัยสมการที่ (4.4) ที่มีตัวแปรเกี่ยวกับอายุโครงสร้างอยู่ด้วยสำหรับที่จะทำการแปรผันอายุโครงสร้างให้ได้ค่าระยะคาร์บอนชั้นที่อายุโครงสร้างต่าง ๆ กัน จึงทำให้ค่าตัวแปรสุ่มปกติมาตรฐานของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นที่ได้หลากหลายอายุมากยิ่งขึ้น

$$Z = \frac{(\bar{X}_{car,real(pH)} - \bar{X}_{cover}) - (0)}{\sqrt{s_{car,real}^2 + s_{cover}^2}} \quad (4.5)$$

โดย  $Z$  คือค่าตัวแปรสุ่มปกติมาตรฐาน (นำไปเปิดตารางพื้นที่ใต้โค้ง) ของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น

0 คือค่าผลต่างของข้อมูลระยะคาร์บอนชั้นเฉลี่ยและระยะหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ยที่ทำให้เหล็กเสริมมีโอกาสเกิดสนิม ( $\bar{X}_{car,real(pH)} > \bar{X}_{cover}$ )

$\bar{X}_{cover}$  คือระยะหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ย (มม.)

$\bar{X}_{car,real(pH)}$  คือระยะคาร์บอนชั้นเฉลี่ยที่มีการบวกเพิ่ม 10 มม. ตามมาตรฐาน JSCE (มม.)

$s_{car,real}$  คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะคาร์บอนชั้นเฉลี่ย

$s_{cover}$  คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ย

เมื่อได้ค่าตัวแปรสุ่มปกติมาตรฐานของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแล้ว นำค่าดังกล่าวมาเปิดตารางพื้นที่ใต้โค้งปกติมาตรฐาน ซึ่งพื้นที่ใต้โค้งปกติมาตรฐานนี้คือความน่าจะเป็นที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิม

จากภาพที่ 4.24, 4.25 และ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ของอายุโครงสร้างกับความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างสะพานลอยที่มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ในเขตอำเภอกำแพงแสน อำเภอเมือง และอำเภอนครชัยศรี ตามลำดับ ซึ่งพบว่าทุกช่วงอายุของโครงสร้างในทุกๆ สะพานลอยมีความเสี่ยงของการเกิดสนิมแตกต่างกัน เช่นเมื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานของโครงสร้าง 100 ปี ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของสะพานลอยที่มีสถานที่ตั้งในเขตอำเภอเมือง นครปฐม อาทิ สะพานลอย กม. 95+51 (หนองดินแดง) ความเสี่ยงของการเกิดสนิมร้อยละ 95.51 สะพานลอย กม. 63+230 (ศาลยาววน) ความเสี่ยงของการเกิดสนิมร้อยละ 99.99, สะพานลอย กม. 61+585 (บ้านหนองหิน) ความเสี่ยงของการเกิดสนิมร้อยละ 91.98 เป็นต้น มีความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจาก คาร์บอนชั้นสูงกว่าสะพานลอยที่ตั้งอยู่ในเขตอำเภอนครชัยศรีและอำเภอกำแพงแสน เช่น สะพานลอย กม. 47+485 (วัดเสถียร) ความเสี่ยงของการเกิดสนิมร้อยละ

56.38 และสะพานลอย กม. 23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา) ความเสี่ยงของการเกิดสนิมร้อยละ 30.91 เป็นต้น

ในขณะเดียวกันถ้าพิจารณาโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสภาวะสิ่งแวดล้อมที่คล้ายคลึงกัน เช่น สะพานลอย กม. 24+166 (โลตัสกำแพงแสน) และสะพานลอย กม. 17+835 (ทุ่งเศรษฐี) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของสะพานลอยโลตัสกำแพงแสนสูงกว่าสะพานลอยทุ่งเศรษฐี แต่เมื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานของโครงสร้าง 100 ปีเท่ากัน พบว่าความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นของสะพานลอยทุ่งเศรษฐี เท่ากับร้อยละ 38.95 ซึ่งสูงกว่าสะพานลอยโลตัสกำแพงแสน เท่ากับร้อยละ 28.56 ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากกระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่ต่างกัน คือ สะพานลอยทุ่งเศรษฐี มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมน้อยกว่าสะพานลอยโลตัสกำแพงแสน ย่อมส่งผลให้ระยะคาร์บอนเนชั่นเข้าทำลายคอนกรีตจนส่งผลกระทบต่อเหล็กเสริมภายในคอนกรีตได้เร็วขึ้น

นอกจากนี้จากตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.25 และ 4.26 ยังพบอีกว่าโครงสร้างสะพานลอยที่มีอายุใกล้เคียงกัน คือสะพานลอย กม. 50 + 174 (วัดธรรมศาลา) ซึ่งมีที่ตั้งโครงสร้างอยู่ในอำเภอเมืองนครปฐม มีค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นสูงกว่าสะพานลอย 45 + 648 (วัดศิระทอง) แต่เมื่อเปรียบเทียบความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นพบว่าสะพานลอยวัดธรรมศาลา (ความเสี่ยงของการเกิดสนิมร้อยละ 21.66 ที่อายุการใช้งาน 100 ปี) มีความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นน้อยกว่าสะพานลอยวัดศิระทอง (ความเสี่ยงของการเกิดสนิมร้อยละ 54.79 ที่อายุการใช้งาน 100 ปี) ทั้งนี้เนื่องมาจากกระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่ต่างกันคือระยะหุ้มเหล็กเสริมของสะพานลอยวัดศิระทองมีค่าน้อยกว่าสะพานลอยวัดธรรมศาลา ย่อมส่งผลให้ระยะคาร์บอนเนชั่นเข้าทำลายคอนกรีตจนส่งผลกระทบต่อเหล็กเสริมภายในคอนกรีตได้เร็วขึ้น

ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาภาพที่ 4.24, 4.25 และ 4.26 พบว่าความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นที่อายุการใช้งานโครงสร้าง 100 ปีของสะพานลอยที่มีตำแหน่งที่ตั้งในอำเภอนครชัยศรีมีแนวโน้มความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นสูงกว่าโครงสร้างที่มีตำแหน่งที่ตั้งในเขตอำเภอกำแพงแสน แต่ต่ำกว่าโครงสร้างที่มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ในอำเภอเมืองนครปฐม สำหรับความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น ณ เวลาที่ทำการทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่น (พ.ศ.2558) ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าสะพานลอยที่มีที่ตั้งในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นสูงกว่าสะพานลอยที่ตั้งอยู่ในเขตอำเภอนครชัยศรีและกำแพงแสน จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นมีสาเหตุเนื่องมาจาก

1) อัตราการพัฒนา ระยะคาร์บอนเนชั่นต่างกัน คือในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีอัตราการพัฒนาระยะคาร์บอนเนชั่นสูงกว่าในเขตอำเภอนครชัยศรีและกำแพงแสน

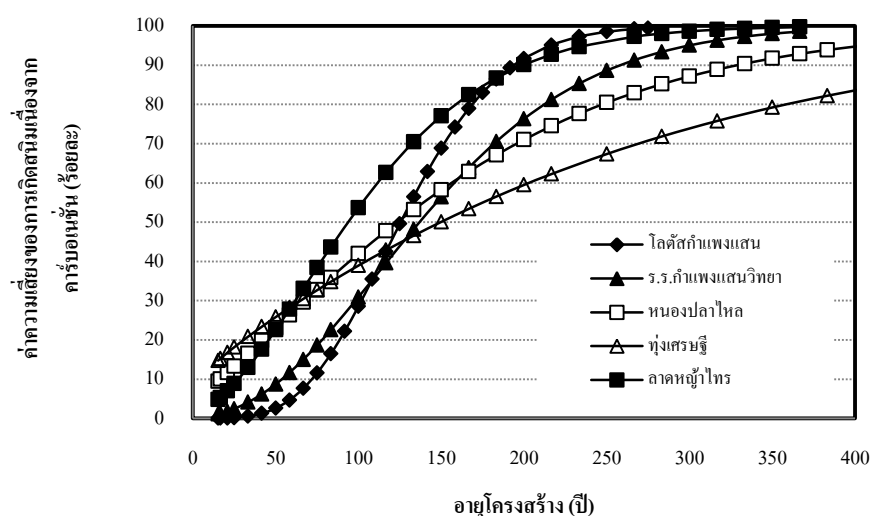
2) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่มีระยะต่างกัน ซึ่งจะมีส่วนทำให้คาร์บอนเนชั่นเข้าไปถึงตำแหน่งเหล็กเสริม จนทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมลดต่ำลงใกล้หรือต่ำกว่าระดับวิกฤติได้ต่างกัน

3) ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ที่มีปริมาณพอเหมาะต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นในอัตราที่ต่างกัน คือในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าในเขตอำเภอนครชัยศรีและกำแพงแสน

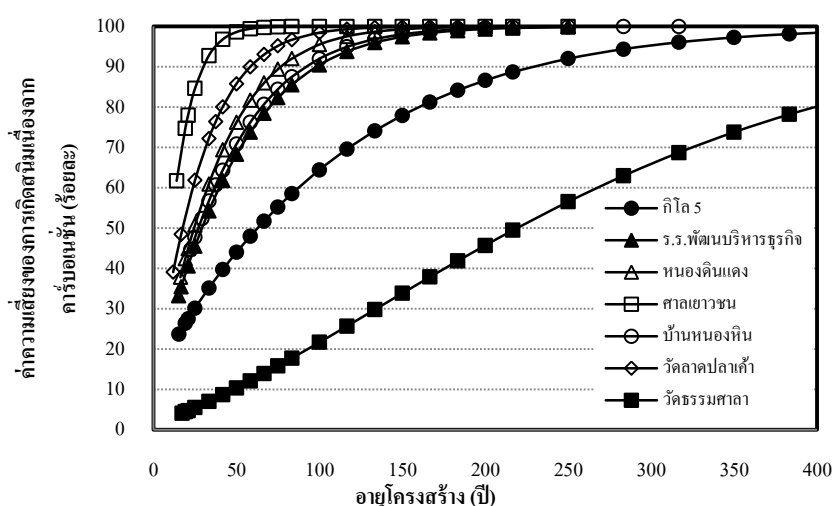
4) คุณภาพของคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างของแต่ละพื้นที่ต่างกัน

5) อายุของโครงสร้างต่างกัน คือโครงสร้างสะพานลอยในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีแนวโน้มการก่อสร้างก่อนโครงสร้างอาคารในเขตอำเภอกำแพงแสนจึงทำให้โครงสร้างสะพานลอยในเขต อำเภอเมืองนครปฐมมีอายุมากกว่าในเขตอื่นๆ

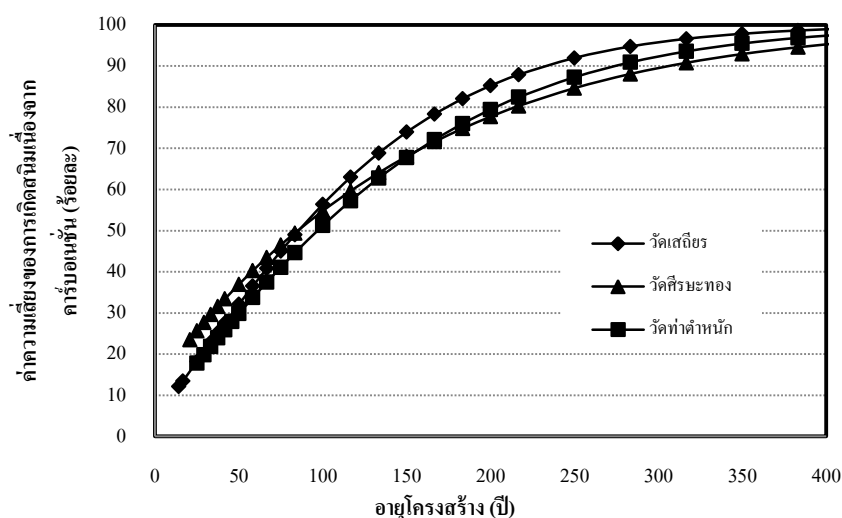
และการควบคุมงานก่อสร้างก็มีผลต่ออายุโครงสร้างได้เช่นกัน การให้รายละเอียดของเหล็กเสริมหรือระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่ไม่ชัดเจน การไม่คำนึงถึงการเทคอนกรีตที่ดี คอนกรีตเกิดการแยกตัว ซึ่งทั้งหมดเหล่านี้ล้วนเป็นปัจจัยที่นำไปสู่ปัญหาทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างสั้นลง



ภาพที่ 4.24 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของสะพานลอยที่มีตำแหน่งที่ตั้งในเขตอำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม



ภาพที่ 4.25 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของสะพานลอยที่มีตำแหน่งที่ตั้งในเขตอำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม



ภาพที่ 4.26 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นของสะพานลอยที่มีตำแหน่งที่ตั้งในเขต  
อำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม

จากตารางที่ 4.6 พบว่าร้อยละความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น ณ เวลาที่ทำการทดสอบ (พ.ศ.2558) และที่อายุการใช้งาน 100 ปีของสะพานลอยในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีค่าสูงกว่าสะพานลอยในเขตปริมณฑลอื่นเนื่องจากเหตุผลที่สอดคล้องกับการเกิดระยะคาร์บอนเนชั่นดังกล่าวข้างต้น

แต่อย่างไรก็ตามในอนาคตข้างหน้าเปอร์เซ็นต์ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นของสะพานลอยต่างๆ ที่ตรวจสอบทั้งหมดอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่บ้าง โดยเฉพาะอายุโครงสร้างที่มากขึ้น (ในอนาคต) อัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปจากปัจจุบันไม่มากนัก เนื่องจากปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นในอนาคตอาจมีการเปลี่ยนแปลง เช่น สภาพแวดล้อม เป็นต้น แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นร้อยละความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในระดับที่มากขึ้นแตกต่างกันได้ เช่น วางแผนการดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นต้น ซึ่งในอนาคตข้างหน้าอาจจะมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อความแม่นยำของผลที่ได้ก็อาจเป็นไปได้

ตารางที่ 4.6 ร้อยละความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น ณ เวลาที่ทำการทดสอบ  
(พ.ศ.2558) ที่อายุการใช้งาน 50 และ 100 ปี

| โครงการที่เข้าตรวจสอบ             | สถานที่ตั้ง<br>(อำเภอ) | อายุ<br>(เดือน) | ร้อยละความเสี่ยงการเกิดสนิม  |                            |                             |
|-----------------------------------|------------------------|-----------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
|                                   |                        |                 | ณ เวลาที่ทดสอบ<br>(พ.ศ.2558) | ที่อายุการใช้<br>งาน 50 ปี | ที่อายุการใช้<br>งาน 100 ปี |
| ก.ม.24+166 (โลตส์กำแพงแสน)        | กำแพงแสน               | 183             | 0.03                         | 2.59                       | 28.56                       |
| ก.ม.23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา)    | กำแพงแสน               | 183             | 1.11                         | 8.73                       | 30.91                       |
| ก.ม.19+235 (หนองปลาไหล)           | กำแพงแสน               | 183             | 9.44                         | 23.06                      | 41.97                       |
| ก.ม.17+835 (ทุ่งเศรษฐี)           | กำแพงแสน               | 183             | 14.77                        | 25.82                      | 38.94                       |
| ก.ม.15+760 (ลาดหญ้าไทร)           | กำแพงแสน               | 183             | 4.79                         | 22.57                      | 53.64                       |
| ก.ม.5+650 (กิโล 5)                | เมือง                  | 183             | 23.72                        | 43.97                      | 64.42                       |
| ก.ม.66+780 (ร.ร.พัฒนบริหารธุรกิจ) | เมือง                  | 180             | 33.22                        | 68.27                      | 90.46                       |
| ก.ม.64+075 (หนองดินแดง)           | เมือง                  | 194             | 37.81                        | 76.22                      | 95.51                       |
| ก.ม.63+230 (ศาลยาวชน)             | เมือง                  | 167             | 61.72                        | 98.6                       | 99.99                       |
| ก.ม.61+585 (บ้านหนองหิน)          | เมือง                  | 269             | 44.62                        | 70.8                       | 91.98                       |
| ก.ม.59+785 (วัดลาดปลาเค้า)        | เมือง                  | 142             | 39.08                        | 85.79                      | 98.46                       |
| ก.ม.50+174 (วัดธรรมศาลา)          | เมือง                  | 207             | 4.12                         | 10.36                      | 21.66                       |
| ก.ม.47+485 (วัดเสถียร)            | นครชัยศรี              | 171             | 12.1                         | 32.09                      | 56.39                       |
| ก.ม.45+648 (วัดศรีชะทอง)          | นครชัยศรี              | 207             | 21.61                        | 36.94                      | 54.79                       |
| ก.ม.42+960 (วัดท่าตำหนัก)         | นครชัยศรี              | 269             | 16.5                         | 29.86                      | 51.22                       |

#### 4.8 เปรียบเทียบระยะคาร์บอนชั้นจากโครงสร้างจริงและการออกแบบ

##### 4.8.1 การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องเผชิญคาร์บอนชั้น

เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ต้องเผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะแพร่เข้าไปในคอนกรีต และทำปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นซึ่งจะทำให้ความสามารถของคอนกรีตในการปกป้องเหล็กเสริมจากการเป็นสนิมลดลงจนทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ เพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตมีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นและมีอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซม (Repair-free service life) ตามที่กำหนด ต้องควบคุมให้ค่าคาร์บอนชั้นในช่วงอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซมมีค่าไม่มากกว่าระยะหุ้มเหล็กเสริม โดยสามารถใช้สมการ (4.6) ในการออกแบบ

$$X_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \cdot \sqrt{t} \quad (4.6)$$

$X_c$  คือระยะคาร์บอนชั้น (มม.) วัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ

$\alpha_1$  คือสัมประสิทธิ์การสัมผัสความเปียกชื้น (1.00 สำหรับผิวคอนกรีตที่ไม่สัมผัสความเปียกชื้น, 0.95 สำหรับผิวคอนกรีตที่สัมผัสความเปียกชื้น)

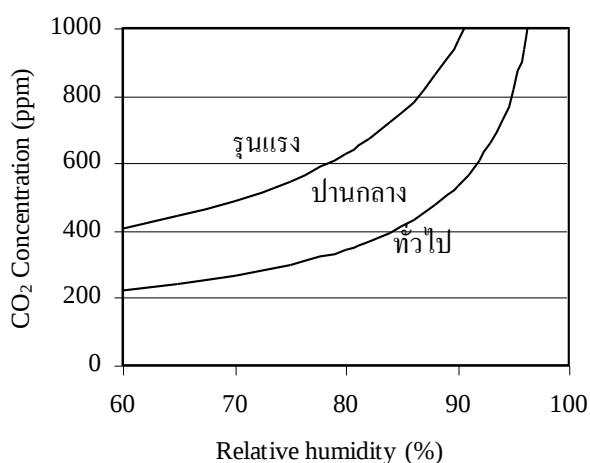
$\alpha_2$  คือสัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้นดังตารางที่ 4.7

$t$  คืออายุของโครงสร้าง (เดือน)

ตารางที่ 4.7 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเข้มข้น [2]

| ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม       | $\alpha_2$ |
|--------------------------------|------------|
| สภาวะทั่วไป                    | 0.65       |
| เสี่ยงต่อคาร์บอนเข้มข้นปานกลาง | 0.85       |
| เสี่ยงต่อคาร์บอนเข้มข้นรุนแรง  | 1.00       |

ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเข้มข้น สามารถกำหนดได้โดยใช้ภาพที่ 4.27 โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของบริเวณสถานที่ที่จะทำการก่อสร้างในช่วงอายุการใช้งาน ซึ่งอาจต้องคาดการณ์ล่วงหน้าไปในอนาคต

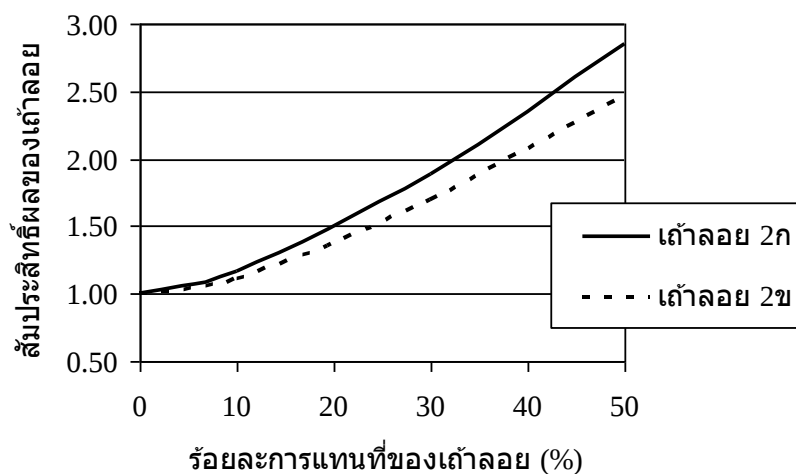


ภาพที่ 4.27 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเข้มข้น [2]

$k$  คือสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเข้มข้น ดังสมการ  $k = 17.5 \cdot k_r \cdot (w/b)^3$

$(w/b)$  คืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

โดยค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน ( $k_r$ ) (ชนิดของเถ้าลอย 2ก และ 2ข กำหนดตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 หรือ ว.ส.ท. 1014-46) ดังภาพ 4.28



ภาพที่ 4.28 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน [2]

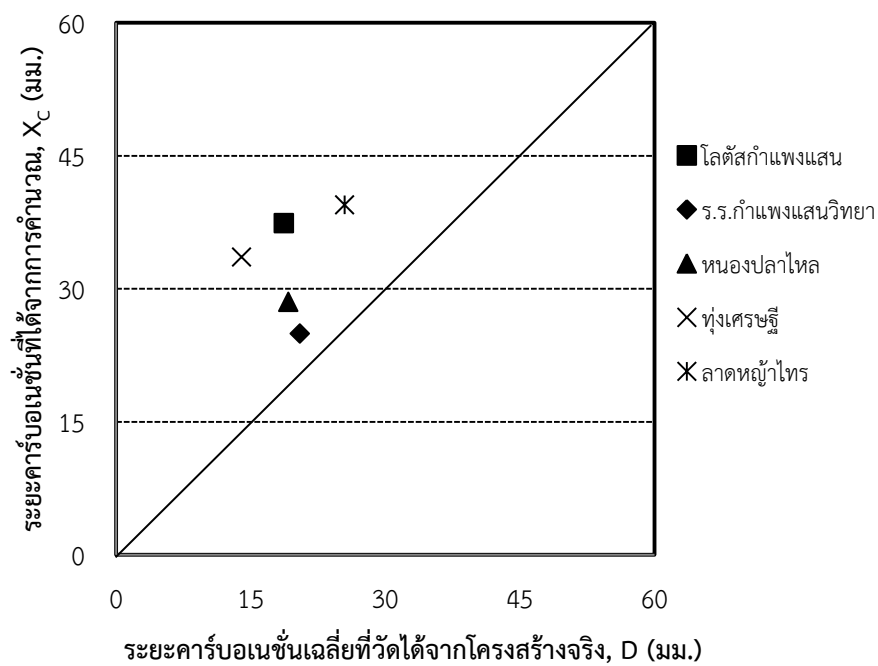
#### 4.8.2 เปรียบเทียบระยะคาร์บอนชั้นจากการออกแบบและโครงสร้างจริง

ภาพที่ 4.29 และตารางที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะคาร์บอนชั้นที่ได้จากโครงสร้างจริงเทียบกับการออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบความคงทนสำหรับโครงสร้างที่เผชิญคาร์บอนชั้น พบว่าทั้ง 15 สะพานลอยที่ทำการตรวจสอบมีค่าระยะคาร์บอนชั้นเฉลี่ยที่วัดได้จากโครงสร้างจริงน้อยกว่าที่ได้จากการคำนวณที่ใช้แบบจำลอง ซึ่งทำให้เห็นว่าโครงสร้างจริงอาจมีตัวแปรที่มีส่วนช่วยทำให้ระยะคาร์บอนชั้นลดน้อยลงกว่าการคำนวณที่ใช้แบบจำลอง เป็นต้น

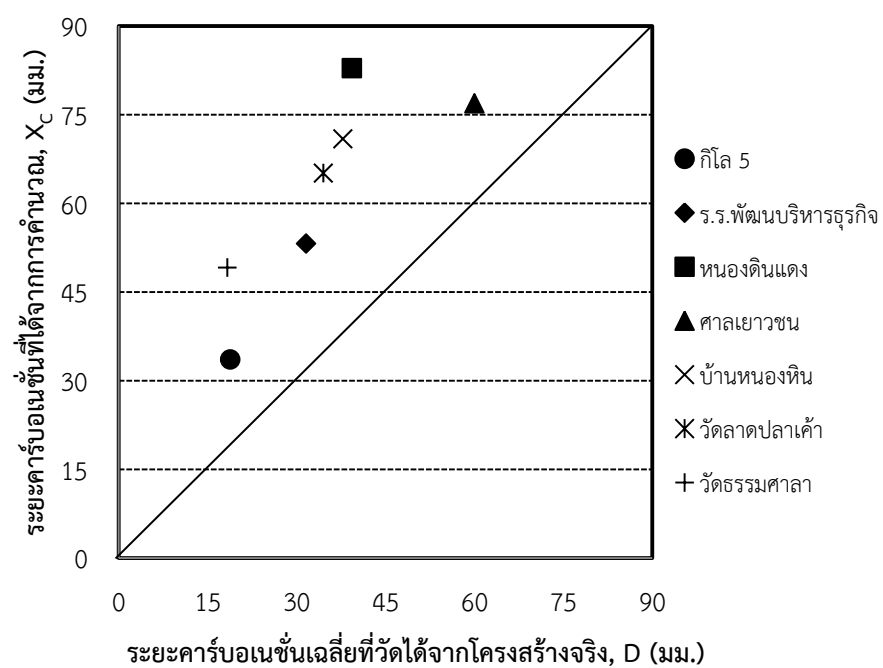
ตารางที่ 4.8 ระยะคาร์บอนชั้นที่ได้จากการออกแบบและโครงสร้างจริง

| โครงการที่ตรวจสอบ                 | อายุ<br>(เดือน) | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\sqrt{t}$ | $k$<br>(มม./เดือน <sup>1/2</sup> ) | $x_c$<br>(มม.) | $D$<br>(มม.) |
|-----------------------------------|-----------------|------------|------------|------------|------------------------------------|----------------|--------------|
| ก.ม.24+166 (โลตส์กำแพงแสน)        | 183             | 0.95       | 1.00       | 13.53      | 2.91                               | 37.40          | 18.70        |
| ก.ม.23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา)    | 183             | 0.95       | 1.00       | 13.53      | 1.94                               | 24.93          | 20.50        |
| ก.ม.19+235 (หนองปลาไหล)           | 183             | 0.95       | 0.85       | 13.53      | 2.61                               | 28.51          | 19.20        |
| ก.ม.17+835 (ทุ่งเศรษฐี)           | 183             | 0.95       | 1.00       | 13.53      | 2.61                               | 33.54          | 14.00        |
| ก.ม.15+760 (ลาดหญ้าไทร)           | 183             | 0.95       | 1.00       | 13.53      | 3.07                               | 39.45          | 25.50        |
| ก.ม.5+650 (กิโล 5)                | 183             | 0.95       | 1.00       | 13.53      | 2.61                               | 33.54          | 18.80        |
| ก.ม.66+780 (ร.ร.พัฒนบริหารธุรกิจ) | 180             | 0.95       | 1.00       | 13.42      | 4.17                               | 53.15          | 31.60        |
| ก.ม.64+075 (หนองดินแดง)           | 194             | 0.95       | 1.00       | 13.93      | 6.26                               | 82.83          | 39.30        |
| ก.ม.63+230 (ศาลยาวชน)             | 167             | 0.95       | 1.00       | 12.92      | 6.26                               | 76.85          | 60.00        |
| ก.ม.61+585 (บ้านหนองหิน)          | 269             | 0.95       | 1.00       | 11.92      | 6.26                               | 70.87          | 37.80        |
| ก.ม.59+785 (วัดลาดปลาเค้า)        | 142             | 0.95       | 1.00       | 11.92      | 5.75                               | 65.09          | 34.50        |
| ก.ม.50+174 (วัดธรรมศาลา)          | 207             | 0.95       | 1.00       | 14.39      | 3.59                               | 49.07          | 18.30        |
| ก.ม.47+485 (วัดเสถียร)            | 171             | 0.95       | 1.00       | 13.08      | 3.07                               | 38.14          | 21.70        |
| ก.ม.45+648 (วัดศิระทอง)           | 207             | 0.95       | 1.00       | 14.39      | 2.76                               | 37.72          | 17.40        |
| ก.ม.42+960 (วัดท่าตำหนัก)         | 269             | 0.95       | 1.00       | 16.40      | 3.41                               | 53.13          | 24.50        |

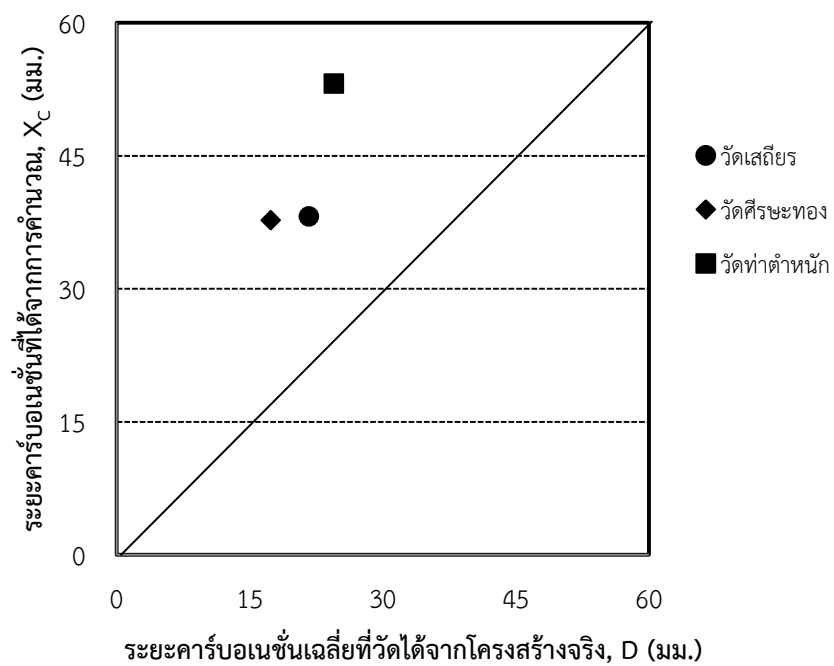
$D$  คือ ระยะคาร์บอนชั้นที่วัดได้จากโครงสร้างจริงรวมสี่



(ก) สะพานลอยอำเภอกำแพงแสน



(ข) สะพานลอยอำเภอเมือง



(ค) สะพานลอยอำเภอ นครชัยศรี

ภาพที่ 4.29 ระยะคาร์บอนเนชั่นที่ได้จากโครงสร้างจริง เทียบกับระยะคาร์บอนเนชั่นตามมาตรฐานการคำนวณที่ใช้แบบจำลองความคงทนสำหรับโครงสร้างที่เผชิญคาร์บอนเนชั่น

## บทที่ 5

### สรุปผล

ในบทนี้กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ รวมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆที่เป็นประโยชน์เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนางานวิจัยครั้งต่อไป

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ความเสียหายที่เกิดจากการตรวจสอบด้วยตาเปล่าพบว่าทุกสะพานลอยเกิดปัญหาเกี่ยวกับเหล็กเสริมเกิดสนิมและการกะเทาะของคอนกรีตหุ้มเหล็กได้อย่างชัดเจน คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเป็นทางยาว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างในพื้นที่ดังกล่าวเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความคงทนในระดับหนึ่ง
2. ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมสะพานลอยทั้ง 15 สะพานลอย มีค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยเท่ากับ 657-698 ppm และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 33-52 ซึ่งจัดอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นในระดับรุนแรง
3. ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างสะพานลอยทั้ง 15 สะพานลอย มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 48-75 มม. ซึ่งมีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานในการก่อสร้างของกรมทางหลวงคือ 30 มม.
4. ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของโครงสร้างสะพานลอยทั้ง 15 สะพานลอย มีค่าอยู่ระหว่าง 213-389 กก./ซม.<sup>2</sup> ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าที่ใช้ในการก่อสร้างของกรมทางหลวงคือ 210 กก./ซม.<sup>2</sup>
5. ระยะคาร์บอนเนชั่นเฉลี่ยของสะพานลอยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 14-60 มม.
6. อัตราการพัฒนาระยะคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างสะพานลอยที่มีตำแหน่งในอำเภอเมืองนครปฐม มีแนวโน้มสูงกว่าของโครงสร้างสะพานลอยที่ตำแหน่งในเขตปริมณฑลอื่น และการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างสะพานลอยที่อยู่ในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีค่าสูงกว่าในเขตอำเภอนครชัยศรีและกำแพงแสน
7. ด้วยวิธีการนำเสนอ สามารถคำนวณความเสี่ยงการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นที่อายุต่างๆกันของโครงสร้างได้ โดยผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการวางแผนดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมคาร์บอนเนชั่นตลอดจนป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สภาวะแวดล้อมในอนาคตอาจมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจจะทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนชั้นมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสมควรที่จะศึกษาในอนาคตต่อไป
2. พื้นที่ที่ศึกษาอยู่ในสภาวะเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนชั้น ซึ่งในอนาคตข้างหน้าอาจมีการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานลอยเนื่องจากแบบอื่นเพิ่มเติม เช่น คลอไรด์ การชะล้าง เป็นต้น ซึ่งสมควรที่จะศึกษาเพิ่มเติมต่อไปในอนาคต

### บรรณานุกรม

- [1] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา “**ความ  
คงทนของคอนกรีต**” พิมพ์ครั้งที่ 1.2543, หน้า 3
- [2] สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล และคณะ “**มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้  
งาน**” ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติ  
สิรินธร (SIIT) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.2553.
- [3] Bakker, R.F.M “Reinforce concrete-Corrosion,” Chapman and Hall Ltd., New York,  
1998.255p.
- [4] Parrott, L.T., A Review of Carbonation in Reinforced Concrete, **Cement and  
Concrete Association**, United Kingdom, 1987.
- [5] American Concrete Institute, ACI 201.2R-92: Guide to Durable Concrete, **ACI  
Manual of Concrete Practice**, Part 1, Michiga, 2000.
- [6] Bassat, M.B., Nixon, P.J., and Hardcastle, J., The Effect of Differences in the  
Composition of Portland Cement on the Properties of Hardened Concrete,  
**Magazine of Concrete Research**, 1990, Vol. 42, No. 151, 59-66.
- [7] Chindaprasirt, P., Cao, T., and Sirivivatnanon V., Blended Cement Technology for  
Durable Concrete Structures, Proceeding of the First Asia/Pacific conference on  
Harmonization of Durability Standard and Performance Tests for Components in  
Building and Infrastructure, 1999, CSIRO, TISTR, AusAID, Bangkok, Thailand.
- [8] RILEM Committee TC 56, Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depth,  
Draft RILEM Recommendation CPC-18, **Material and Structure**, Vol. 21 (126),  
1998.
- [9] สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล และคณะ “**โครงการศึกษาวิจัยการสึกกร่อนของโครงสร้างอาคารคอนกรีต  
เสริมเหล็กที่เกิดจากน้ำทะเล**” ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบัน  
เทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร (SIIT) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.2551.
- [10] Dunster, A.M., Accelerated Carbonation Testing of Cement, BRE Information  
paper IP 20/00, Garston, **Construction Research Communication Ltd.**, December  
2000.
- [11] Atis CD . “Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash”  
**Construction and Building Materials**, 17(3), 2003, pp147-152.
- [12] Poon CS, Wong YL. “The influence of different curing conditions on the pore  
structure and related properties of fly ash cement pastes and mortars”  
**Construction and Building Materials**, 11(7-8), 1997, pp383-393.
- [13] Isgor OB, Razaqpur AG. “Finite element modeling of coupled heat transfer  
moisture transport and carbonation processes in concrete structure” **Cement and  
Concrete Composites**, 26(1), 2004, pp57-73.

- [14] Papadakis VG. "Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress" **Cement and Concrete Research**, 30(2), 2000, pp291-299.
- [15] Gataldini ALG, Isaia GC, Gomes NS, Sperb JEK. "Chloride penetration and carbonation in concrete with rice husk ash and chemical activators" **Cement and Concrete Composites**.
- [16] Jonc MR, Dhir RK, Magee BJ. "Concrete containing ternary blended binders: Resistance to chloride ingress and carbonation" **Cement and Concrete Research**, 27(6), 1997, pp825-831.
- [17] N.I. Fattuhi, "Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period ," **Materiaux et Constructions**, Vol 19, 1986.
- [18] Jin-Keun Kim , Chin-Yong Kim , Seong-Tae Yi and Yun Lee "Effect of carbonation on the rebound number and compressive strength of concrete," **Cement & Concrete Composites** , Vol31 , 2009 pp 139–144.
- [19] J. Banjongrat, K. Wongpiyachetchai, R. Sahamitmongkol and S. Tangtermsirikul "Effect of Plastering Mortar and Paint On Carbonation Resistance of Concrete" Proceedings of the 6 Annual Concrete Conference, Thai Concrete Association, Thailand, 2010.
- [20] H. A1-Khayat 1, M. N. Haque I and N. I. Fattuhi "Concrete carbonation in arid climate," **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, Vol. 35, 2002. pp 421-426.
- [21] Cengiz Duran Atis "Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash," **Construction and Building Materials** , Vol 17 , 2003. pp.147–152.
- [22] บุรฉัตร ฉัตรวีระ และทวิสันท์ คงทรัพย์ "ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้ากลบดำจากโรงสีข้าว," **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร**, ปีที่ 25 ฉบับที่ 4 , 2545, หน้า 373-389.
- [23] J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul and T. Leelawat "A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete," **Construction and Building Materials**, Vol 20, 2006. pp 744-753.
- [24] S. K. Roy t, D. O. Northwood and K. B. Poh "Effect of plastering on the carbonation of a 19-year-old reinforced concrete building," **Construction and Building Materials**, Vol. 10, No. 4, 1996. pp 261-272.
- [25] Khan MI, Lynsdale CJ. "Strength permeability and carbonation of high-performance concrete" **Cement and Concrete Research**, 32(1), 2002, pp123-131.
- [26] Khatib JM, Mangat PS. "Porosity of cement paste cured at 45°C as a function of location relative to casting position" **Cement and Concrete Composites**. 25(1), 2003, pp97-108.

- [27] Gonen T, Yazicioglu S. "The influence of compaction pore on sorptivity and carbonation of concrete" **Construction and Building Materials**, 25(1), 2007, pp1040-1045.
- [28] S.K. Roy, K.B. Poh and D.O. Northwood "Durability of concrete accelerated carbonation and weathering studies," **Building and Environment**, Vol 23, 1999, pp597-606.
- [29] M.N. Haque, H. Al-Khaiat and B. John "Climatic zone-A prelude to designing durable concrete structures in the Arabian Gulf," **Building and Environment**, Vol42, 2007, pp 2410-2416.
- [30] P. Castro, E.I. Morenob and J. Genesca "Influence of marine micro-climates on carbonation of reinforced concrete buildings," **Cement and Concrete Research**, Vol 30, 2000, pp 1565- 1571.
- [31] M.G. Alexander, J.R. Mackechnie and W. Yam "Carbonation of concrete bridge structures in three South African localities," **Cement & Concrete Composites**, Vol 29, 2007, pp 750-759.
- [32] M. N. Haque & H. Al-Khaiat "Carbonation of Concrete Structures in Hot Dry Coastal Regions," **Cement and Concrete Composites**, Vol 19, 1997, pp 123-129.
- [33] วังนวัณค์ กริพละ, รัฐภูมิ ปริชาติปรีชา, สรรค์ สยามิภักดิ์, ธนากร "การสำรวจ ทดสอบและประเมินสภาพโครงสร้างเสา โครงการทางรถไฟยกระดับ," **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี**, ครั้งที่ 3, 2550. หน้า 26-34.
- [34] กรมทางหลวง "แบบฟอร์มบันทึกการสำรวจความเสียหายของโครงสร้างสะพานลอย"
- [35] JSCE Guidelines for Concrete No.6: Standard Specifications for Concrete Structures – 2002 "Materials and Construction"
- [36] Standard drawings, 1994. Kingdom of Thailand ministry of transport and communications department of highways.
- [37] รัฐันสถานการณปัจจุบัน : ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์: <http://www.environnet.in.th>.
- [38] Concrete in Australia, Vol. 36, No 3, pp29-43.
- [39] คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์, 2535. **ความน่าจะเป็นและสถิติ**. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [40] Tangtermsirikul S. "Durability and mix design of concrete" Printing House of Thammasat University, First Edition .2003. pp71-80.
- [41] สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล และ รักติพงษ์ สหมิตรมงคล "มาตรฐานงานตรวจสอบโครงสร้างอาคารที่พักอาศัยคอนกรีตเสริมเหล็ก (สำหรับการเคหะแห่งชาติ)" ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา(CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร (SIIT) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2553.

ภาคผนวก

ข้อมูลการสะท้อนกลับจากค้อนกระแทก

ระยะคาร์บอนชั้น

ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

ก.ม.24+166 (โลตส์กำแพงแสน)

| ตำแหน่ง | ค่าการสะท้อน RN |          |          | เฉลี่ย |
|---------|-----------------|----------|----------|--------|
|         | จุดที่ 1        | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 |        |
| ที่ 1   | 39.67           | 39.25    | 40.33    | 39.75  |
| ที่ 2   | 34.67           | 36.17    | 37.75    | 36.19  |
| ที่ 3   | 41.42           | 39.75    | 42.50    | 41.22  |
| ที่ 4   | 40.00           | 40.58    | 40.75    | 40.44  |
| ที่ 5   | 43.83           | 43.83    | 44.33    | 44.00  |
| ที่ 6   | 38.92           | 45.33    | 46.17    | 43.47  |
|         |                 |          |          | 40.85  |

ก.ม.23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา)

| ตำแหน่ง | ค่าการสะท้อน RN |          |          | เฉลี่ย |
|---------|-----------------|----------|----------|--------|
|         | จุดที่ 1        | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 |        |
| ที่ 1   | 44.42           | 44.00    | 44.50    | 44.31  |
| ที่ 2   | 45.08           | 44.42    | 43.83    | 44.44  |
| ที่ 3   | 45.58           | 45.83    | 46.58    | 46.00  |
| ที่ 4   | 47.75           | 49.17    | 48.83    | 48.58  |
| ที่ 5   | 47.25           | 43.83    | 44.33    | 45.14  |
| ที่ 6   | 43.67           | 46.42    | 41.58    | 43.89  |
|         |                 |          |          | 45.39  |

ก.ม.19+235 (หนองปลาไหล)

| ตำแหน่ง | ค่าการสะท้อน RN |          |          | เฉลี่ย |
|---------|-----------------|----------|----------|--------|
|         | จุดที่ 1        | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 |        |
| ที่ 1   | 47.33           | 47.58    | 46.92    | 47.28  |
| ที่ 2   | 40.67           | 42.75    | 44.17    | 42.53  |
| ที่ 3   | 42.00           | 43.17    | 41.92    | 42.36  |
| ที่ 4   | 41.50           | 42.00    | 42.67    | 42.06  |
| ที่ 5   | 40.58           | 42.25    | 40.33    | 41.06  |
| ที่ 6   | 41.17           | 42.42    | 40.83    | 41.47  |
|         |                 |          |          | 42.79  |

ก.ม.17+835 (ทุ่งเศรษฐี)

| ตำแหน่ง | ค่าการสะท้อน RN |          |          | เฉลี่ย |
|---------|-----------------|----------|----------|--------|
|         | จุดที่ 1        | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 |        |
| ที่ 1   | 42.42           | 43.33    | 41.17    | 42.31  |
| ที่ 2   | 41.58           | 40.00    | 40.92    | 40.83  |
| ที่ 3   | 38.58           | 40.08    | 41.58    | 40.08  |
| ที่ 4   | 47.17           | 45.83    | 46.83    | 46.61  |
| ที่ 5   | 45.08           | 43.50    | 45.67    | 44.75  |
| ที่ 6   | 43.42           | 42.42    | 44.67    | 43.50  |
|         |                 |          |          | 43.01  |

ก.ม.15+760 (ลาดหญ้าไทร)

| ตำแหน่ง | ค่าการสะท้อน RN |          |          | เฉลี่ย |
|---------|-----------------|----------|----------|--------|
|         | จุดที่ 1        | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 |        |
| ที่ 1   | 35.25           | 39.92    | 42.50    | 39.22  |
| ที่ 2   | 35.83           | 37.75    | 39.75    | 37.78  |
| ที่ 3   | 41.75           | 41.75    | 35.75    | 39.75  |
| ที่ 4   | 40.50           | 41.75    | 41.75    | 41.33  |
| ที่ 5   | 43.92           | 44.25    | 43.75    | 43.97  |
| ที่ 6   | 40.50           | 41.75    | 36.83    | 39.69  |
|         |                 |          |          | 40.29  |

ก.ม.5+650 (กิโล 5)

| ตำแหน่ง | ค่าการสะท้อน RN |          |          | เฉลี่ย |
|---------|-----------------|----------|----------|--------|
|         | จุดที่ 1        | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 |        |
| ที่ 1   | 41.50           | 42.08    | 42.67    | 42.08  |
| ที่ 2   | 43.67           | 44.25    | 44.33    | 44.08  |
| ที่ 3   | 44.75           | 44.25    | 43.75    | 44.25  |
| ที่ 4   | 38.25           | 40.42    | 39.50    | 39.39  |
| ที่ 5   | 40.92           | 46.17    | 44.25    | 43.78  |
| ที่ 6   | 42.67           | 42.17    | 43.83    | 42.89  |
|         |                 |          |          | 42.75  |

ก.ม.66+780 (ร.ร.พัฒนบริหารธุรกิจ)

| ตำแหน่ง | ค่าการสะท้อน RN |          |          | เฉลี่ย |
|---------|-----------------|----------|----------|--------|
|         | จุดที่ 1        | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 |        |
| ที่ 1   | 33.75           | 33.92    | 35.25    | 34.31  |
| ที่ 2   | 36.50           | 37.25    | 36.83    | 36.86  |
| ที่ 3   | 35.08           | 35.33    | 35.25    | 35.22  |
| ที่ 4   | 36.33           | 36.58    | 36.58    | 36.50  |
| ที่ 5   | 36.00           | 35.67    | 36.08    | 35.92  |
| ที่ 6   | 37.42           | 38.17    | 39.08    | 38.22  |
|         |                 |          |          | 36.17  |

ก.ม.64+075 (หนองดินแดง)

| ตำแหน่ง | ค่าการสะท้อน RN |          |          | เฉลี่ย |
|---------|-----------------|----------|----------|--------|
|         | จุดที่ 1        | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 |        |
| ที่ 1   | 30.92           | 31.25    | 29.92    | 30.69  |
| ที่ 2   | 31.17           | 30.50    | 31.08    | 30.92  |
| ที่ 3   | 30.17           | 30.33    | 30.42    | 30.31  |
| ที่ 4   | 34.08           | 34.25    | 33.92    | 34.08  |
| ที่ 5   | 31.67           | 31.75    | 31.08    | 31.50  |
| ที่ 6   | 33.33           | 32.83    | 32.92    | 33.03  |
|         |                 |          |          | 31.75  |

ก.ม.63+230 (ศาลยาวชน)

| ตำแหน่ง | ค่าการสะท้อน RN |          |          | เฉลี่ย |
|---------|-----------------|----------|----------|--------|
|         | จุดที่ 1        | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 |        |
| ที่ 1   | 31.00           | 32.08    | 33.25    | 32.11  |
| ที่ 2   | 29.17           | 30.42    | 30.33    | 29.97  |
| ที่ 3   | 31.83           | 33.00    | 33.58    | 32.81  |
| ที่ 4   | 33.58           | 33.17    | 33.58    | 33.44  |
| ที่ 5   | 30.83           | 30.75    | 30.17    | 30.58  |
| ที่ 6   | 29.17           | 28.75    | 28.67    | 28.86  |
|         |                 |          |          | 31.30  |

ก.ม.61+585 (บ้านหนองหิน)

| ตำแหน่ง | ค่าการสะท้อน RN |          |          | เฉลี่ย |
|---------|-----------------|----------|----------|--------|
|         | จุดที่ 1        | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 |        |
| ที่ 1   | 31.50           | 32.92    | 33.92    | 32.78  |
| ที่ 2   | 32.08           | 31.58    | 33.50    | 32.39  |
| ที่ 3   | 29.92           | 30.92    | 28.92    | 29.92  |
| ที่ 4   | 29.83           | 29.25    | 30.58    | 29.89  |
| ที่ 5   | 30.25           | 30.83    | 29.83    | 30.31  |
| ที่ 6   | 35.33           | 33.83    | 33.25    | 34.14  |
|         |                 |          |          | 31.57  |

ก.ม.59+785 (วัดลาดปลาเค้า)

| ตำแหน่ง | ค่าการสะท้อน RN |          |          | เฉลี่ย |
|---------|-----------------|----------|----------|--------|
|         | จุดที่ 1        | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 |        |
| ที่ 1   | 31.75           | 32.17    | 32.17    | 32.03  |
| ที่ 2   | 32.08           | 31.83    | 32.67    | 32.19  |
| ที่ 3   | 32.58           | 32.50    | 32.67    | 32.58  |
| ที่ 4   | 33.25           | 33.00    | 33.42    | 33.22  |
| ที่ 5   | 33.00           | 33.58    | 33.33    | 33.31  |
| ที่ 6   | 35.17           | 35.08    | 35.00    | 35.08  |
|         |                 |          |          | 33.07  |

ก.ม.50+174 (วัดธรรมศาลา)

| ตำแหน่ง | ค่าการสะท้อน RN |          |          | เฉลี่ย |
|---------|-----------------|----------|----------|--------|
|         | จุดที่ 1        | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 |        |
| ที่ 1   | 36.83           | 37.17    | 37.17    | 37.06  |
| ที่ 2   | 34.42           | 35.17    | 35.92    | 35.17  |
| ที่ 3   | 33.42           | 34.25    | 32.67    | 33.44  |
| ที่ 4   | 40.83           | 39.92    | 41.00    | 40.58  |
| ที่ 5   | 40.92           | 40.58    | 41.58    | 41.03  |
| ที่ 6   | 39.33           | 40.50    | 40.33    | 40.06  |
|         |                 |          |          | 37.89  |

ก.ม.47+485 (วัดเสถียร)

| ตำแหน่ง | ค่าการสะท้อน RN |          |          | เฉลี่ย |
|---------|-----------------|----------|----------|--------|
|         | จุดที่ 1        | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 |        |
| ที่ 1   | 40.08           | 41.58    | 41.08    | 40.92  |
| ที่ 2   | 39.17           | 41.08    | 40.17    | 40.14  |
| ที่ 3   | 34.42           | 35.25    | 37.33    | 35.67  |
| ที่ 4   | 38.00           | 39.42    | 40.67    | 39.36  |
| ที่ 5   | 35.83           | 40.58    | 37.42    | 37.94  |
| ที่ 6   | 46.42           | 43.50    | 49.42    | 46.44  |
|         |                 |          |          | 40.08  |

ก.ม.45+648 (วัดศิระชะทอง)

| ตำแหน่ง | ค่าการสะท้อน RN |          |          | เฉลี่ย |
|---------|-----------------|----------|----------|--------|
|         | จุดที่ 1        | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 |        |
| ที่ 1   | 42.08           | 43.25    | 42.75    | 42.69  |
| ที่ 2   | 42.50           | 41.08    | 43.17    | 42.25  |
| ที่ 3   | 42.00           | 44.00    | 43.33    | 43.11  |
| ที่ 4   | 45.42           | 45.42    | 45.42    | 45.42  |
| ที่ 5   | 34.50           | 40.58    | 37.42    | 37.50  |
| ที่ 6   | 37.75           | 37.92    | 41.92    | 39.19  |
|         |                 |          |          | 41.69  |

ก.ม.42+960 (วัดท่าตำหนัก)

| ตำแหน่ง | ค่าการสะท้อน RN |          |          | เฉลี่ย |
|---------|-----------------|----------|----------|--------|
|         | จุดที่ 1        | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 |        |
| ที่ 1   | 37.33           | 39.58    | 40.33    | 39.08  |
| ที่ 2   | 38.25           | 38.83    | 40.75    | 39.28  |
| ที่ 3   | 38.08           | 39.33    | 39.75    | 39.06  |
| ที่ 4   | 40.42           | 42.08    | 40.67    | 41.06  |
| ที่ 5   | 39.67           | 41.25    | 40.83    | 40.58  |
| ที่ 6   | 36.25           | 37.92    | 39.17    | 37.78  |
|         |                 |          |          | 39.47  |

ระยะคาร์บอนขึ้น พื้นที่อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

| ตำแหน่ง                        | ระยะคาร์บอนขึ้น (มม.) |          |          |          |          |          | เฉลี่ย |
|--------------------------------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
|                                | จุดที่ 1              | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 | จุดที่ 4 | จุดที่ 5 | จุดที่ 6 |        |
| ก.ม.24+166 (โลตัสกำแพงแสน)     | 17.25                 | 17.75    | 20.25    | 19.75    | 17.25    | 20.00    | 18.71  |
| ก.ม.23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา) | 24.00                 | 23.00    | 24.00    | 15.00    | 17.25    | 20.00    | 20.54  |
| ก.ม.19+235 (หนองปลาไหล)        | 20.38                 | 20.50    | 19.75    | 20.00    | 17.25    | 17.50    | 19.23  |
| ก.ม.17+835 (ทุ่งเศรษฐี)        | 16.50                 | 17.00    | 17.00    | 11.50    | 10.38    | 11.50    | 13.98  |
| ก.ม.15+760 (ลาดหญ้าไทร)        | 32.75                 | 30.5     | 32.25    | 18.25    | 20.75    | 18.75    | 25.54  |

ระยะคาร์บอนขึ้น พื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม

| ตำแหน่ง                           | ระยะคาร์บอนขึ้น (มม.) |          |          |          |          |          | เฉลี่ย |
|-----------------------------------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
|                                   | จุดที่ 1              | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 | จุดที่ 4 | จุดที่ 5 | จุดที่ 6 |        |
| ก.ม.5+650 (กิโล 5)                | 16.00                 | 16.25    | 16.00    | 23.00    | 20.75    | 20.75    | 18.79  |
| ก.ม.66+780 (ร.ร.พัฒนบริหารธุรกิจ) | 31.13                 | 35.00    | 32.75    | 30.00    | 31.00    | 29.50    | 31.56  |
| ก.ม.64+075 (หนองดินแดง)           | 41.13                 | 44.75    | 44.00    | 35.00    | 35.63    | 35.25    | 39.29  |
| ก.ม.63+230 (ศาลเยาวชน)            | 60.13                 | 59.75    | 59.88    | 59.88    | 60.25    | 60.25    | 60.02  |
| ก.ม.61+585 (บ้านหนองหิน)          | 37.63                 | 37.75    | 38.38    | 37.88    | 37.00    | 38.00    | 37.77  |
| ก.ม.59+785 (วัดลาดปลาเค้า)        | 40.00                 | 38.75    | 38.50    | 28.63    | 29.75    | 31.25    | 34.48  |
| ก.ม.50+174 (วัดธรรมศาลา)          | 18.75                 | 20.25    | 18.00    | 17.38    | 17.25    | 18.00    | 18.27  |

ระยะคาร์บอนขึ้น พื้นที่อำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม

| ตำแหน่ง                   | ระยะคาร์บอนขึ้น (มม.) |          |          |          |          |          | เฉลี่ย |
|---------------------------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
|                           | จุดที่ 1              | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 | จุดที่ 4 | จุดที่ 5 | จุดที่ 6 |        |
| ก.ม.47+485 (วัดเสถียร)    | 21.00                 | 25.63    | 28.88    | 17.38    | 19.63    | 17.50    | 21.67  |
| ก.ม.45+648 (วัดศิระทอง)   | 16.25                 | 17.75    | 17.00    | 17.38    | 18.50    | 17.50    | 17.40  |
| ก.ม.42+960 (วัดท่าตำหนัก) | 20.00                 | 20.63    | 19.50    | 28.00    | 30.00    | 29.00    | 24.52  |

## ก.ม.24+166 (โลตส์กำแพงแสน)

| ตำแหน่ง   | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.) | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.) |
|-----------|-------------------------------|--------------------------------|
| จุดที่ 1  | 85                            | 55                             |
|           | 61                            | 67                             |
|           | 65                            | 56                             |
|           | 62                            | 74                             |
| จุดที่ 2  | 65                            | 67                             |
|           | 66                            | 61                             |
|           | 56                            | 60                             |
|           | 53                            | 53                             |
| จุดที่ 3  | 67                            | 61                             |
|           | 65                            | 67                             |
|           | 75                            | 54                             |
|           | 45                            | 65                             |
| จุดที่ 4  | 66                            | 56                             |
|           | 64                            | 67                             |
|           | 61                            | 64                             |
|           | 55                            | 74                             |
| จุดที่ 5  | 61                            | 58                             |
|           | 53                            | 61                             |
|           | 55                            | 45                             |
|           | 62                            | 58                             |
| จุดที่ 6  | 66                            | 56                             |
|           | 75                            | 61                             |
|           | 62                            | 56                             |
|           | 83                            | 53                             |
| ค่าเฉลี่ย | 63.67                         | 60.38                          |

## ก.ม.23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา)

| ตำแหน่ง   | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.) | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.) |
|-----------|-------------------------------|--------------------------------|
| จุดที่ 1  | 76                            | 70                             |
|           | 75                            | 68                             |
|           | 74                            | 65                             |
|           | 82                            | 69                             |
| จุดที่ 2  | 76                            | 60                             |
|           | 85                            | 70                             |
|           | 75                            | 65                             |
|           | 81                            | 66                             |
| จุดที่ 3  | 72                            | 65                             |
|           | 81                            | 68                             |
|           | 71                            | 66                             |
|           | 68                            | 72                             |
| จุดที่ 4  | 67                            | 60                             |
|           | 67                            | 57                             |
|           | 71                            | 56                             |
|           | 62                            | 69                             |
| จุดที่ 5  | 85                            | 75                             |
|           | 57                            | 72                             |
|           | 86                            | 65                             |
|           | 56                            | 69                             |
| จุดที่ 6  | 67                            | 71                             |
|           | 62                            | 68                             |
|           | 62                            | 67                             |
|           | 59                            | 68                             |
| ค่าเฉลี่ย | 71.54                         | 66.71                          |

## ก.ม.19+235 (หนองปลาไหล)

| ตำแหน่ง   | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.) | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.) |
|-----------|-------------------------------|--------------------------------|
| จุดที่ 1  | 67                            | 50                             |
|           | 71                            | 52                             |
|           | 55                            | 50                             |
|           | 65                            | 69                             |
| จุดที่ 2  | 68                            | 60                             |
|           | 59                            | 64                             |
|           | 61                            | 65                             |
|           | 65                            | 61                             |
| จุดที่ 3  | 67                            | 63                             |
|           | 61                            | 71                             |
|           | 55                            | 66                             |
|           | 68                            | 60                             |
| จุดที่ 4  | 78                            | 54                             |
|           | 83                            | 67                             |
|           | 67                            | 64                             |
|           | 62                            | 69                             |
| จุดที่ 5  | 68                            | 50                             |
|           | 57                            | 72                             |
|           | 75                            | 65                             |
|           | 56                            | 57                             |
| จุดที่ 6  | 67                            | 71                             |
|           | 57                            | 55                             |
|           | 62                            | 67                             |
|           | 59                            | 51                             |
| ค่าเฉลี่ย | 64.71                         | 61.38                          |

## ก.ม.17+835 (ทุ่งเศรษฐี)

| ตำแหน่ง   | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.) | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.) |
|-----------|-------------------------------|--------------------------------|
| จุดที่ 1  | 55                            | 40                             |
|           | 52                            | 47                             |
|           | 52                            | 48                             |
|           | 54                            | 50                             |
| จุดที่ 2  | 56                            | 42                             |
|           | 53                            | 47                             |
|           | 52                            | 50                             |
|           | 54                            | 50                             |
| จุดที่ 3  | 55                            | 40                             |
|           | 52                            | 47                             |
|           | 57                            | 51                             |
|           | 54                            | 50                             |
| จุดที่ 4  | 46                            | 42                             |
|           | 60                            | 43                             |
|           | 51                            | 45                             |
|           | 55                            | 45                             |
| จุดที่ 5  | 46                            | 46                             |
|           | 62                            | 43                             |
|           | 51                            | 45                             |
|           | 55                            | 45                             |
| จุดที่ 6  | 46                            | 46                             |
|           | 60                            | 43                             |
|           | 58                            | 48                             |
|           | 55                            | 45                             |
| ค่าเฉลี่ย | 53.79                         | 45.75                          |

## ก.ม.15+760 (ลาดหญ้าไทร)

| ตำแหน่ง   | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.) | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.) |
|-----------|-------------------------------|--------------------------------|
| จุดที่ 1  | 67                            | 80                             |
|           | 57                            | 75                             |
|           | 59                            | 75                             |
|           | 80                            | 83                             |
| จุดที่ 2  | 67                            | 80                             |
|           | 82                            | 80                             |
|           | 78                            | 72                             |
|           | 81                            | 73                             |
| จุดที่ 3  | 67                            | 80                             |
|           | 83                            | 71                             |
|           | 79                            | 75                             |
|           | 80                            | 83                             |
| จุดที่ 4  | 84                            | 49                             |
|           | 80                            | 52                             |
|           | 59                            | 54                             |
|           | 80                            | 63                             |
| จุดที่ 5  | 78                            | 78                             |
|           | 75                            | 56                             |
|           | 70                            | 69                             |
|           | 80                            | 67                             |
| จุดที่ 6  | 67                            | 59                             |
|           | 57                            | 54                             |
|           | 78                            | 48                             |
|           | 72                            | 58                             |
| ค่าเฉลี่ย | 73.33                         | 68.08                          |

ก.ม.5+650 (กิโล 5)

| ตำแหน่ง   | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.) | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.) |
|-----------|-------------------------------|--------------------------------|
| จุดที่ 1  | 40                            | 45                             |
|           | 46                            | 40                             |
|           | 55                            | 42                             |
|           | 56                            | 45                             |
| จุดที่ 2  | 48                            | 49                             |
|           | 45                            | 43                             |
|           | 41                            | 38                             |
|           | 50                            | 40                             |
| จุดที่ 3  | 48                            | 45                             |
|           | 51                            | 47                             |
|           | 42                            | 42                             |
|           | 50                            | 45                             |
| จุดที่ 4  | 47                            | 45                             |
|           | 46                            | 43                             |
|           | 57                            | 42                             |
|           | 56                            | 45                             |
| จุดที่ 5  | 48                            | 51                             |
|           | 45                            | 43                             |
|           | 42                            | 38                             |
|           | 52                            | 41                             |
| จุดที่ 6  | 48                            | 45                             |
|           | 45                            | 48                             |
|           | 47                            | 42                             |
|           | 50                            | 42                             |
| ค่าเฉลี่ย | 48.13                         | 43.58                          |

## ก.ม.66+780 (ร.ร.พัฒนบริหารธุรกิจ)

| ตำแหน่ง   | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.) | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.) |
|-----------|-------------------------------|--------------------------------|
| จุดที่ 1  | 50                            | 40                             |
|           | 49                            | 55                             |
|           | 43                            | 66                             |
|           | 47                            | 44                             |
| จุดที่ 2  | 45                            | 40                             |
|           | 34                            | 56                             |
|           | 41                            | 44                             |
|           | 51                            | 44                             |
| จุดที่ 3  | 55                            | 47                             |
|           | 55                            | 52                             |
|           | 44                            | 61                             |
|           | 56                            | 56                             |
| จุดที่ 4  | 40                            | 35                             |
|           | 71                            | 41                             |
|           | 64                            | 46                             |
|           | 56                            | 48                             |
| จุดที่ 5  | 69                            | 55                             |
|           | 65                            | 36                             |
|           | 65                            | 39                             |
|           | 72                            | 59                             |
| จุดที่ 6  | 56                            | 50                             |
|           | 56                            | 45                             |
|           | 45                            | 68                             |
|           | 67                            | 59                             |
| ค่าเฉลี่ย | 54.00                         | 49.42                          |

## ก.ม.64+075 (หนองดินแดง)

| ตำแหน่ง   | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.) | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.) |
|-----------|-------------------------------|--------------------------------|
| จุดที่ 1  | 40                            | 46                             |
|           | 55                            | 44                             |
|           | 66                            | 40                             |
|           | 44                            | 47                             |
| จุดที่ 2  | 40                            | 45                             |
|           | 56                            | 34                             |
|           | 44                            | 40                             |
|           | 44                            | 47                             |
| จุดที่ 3  | 47                            | 56                             |
|           | 52                            | 55                             |
|           | 56                            | 44                             |
|           | 56                            | 56                             |
| จุดที่ 4  | 70                            | 63                             |
|           | 75                            | 73                             |
|           | 63                            | 64                             |
|           | 65                            | 59                             |
| จุดที่ 5  | 55                            | 67                             |
|           | 78                            | 65                             |
|           | 66                            | 65                             |
|           | 59                            | 74                             |
| จุดที่ 6  | 50                            | 67                             |
|           | 72                            | 57                             |
|           | 71                            | 57                             |
|           | 76                            | 69                             |
| ค่าเฉลี่ย | 58.33                         | 55.58                          |

## ก.ม.63+230 (ศาลยาวชน)

| ตำแหน่ง   | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.) | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.) |
|-----------|-------------------------------|--------------------------------|
| จุดที่ 1  | 51                            | 61                             |
|           | 53                            | 52                             |
|           | 56                            | 56                             |
|           | 47                            | 47                             |
| จุดที่ 2  | 56                            | 47                             |
|           | 63                            | 52                             |
|           | 56                            | 56                             |
|           | 47                            | 58                             |
| จุดที่ 3  | 56                            | 47                             |
|           | 64                            | 52                             |
|           | 56                            | 56                             |
|           | 52                            | 56                             |
| จุดที่ 4  | 67                            | 55                             |
|           | 55                            | 55                             |
|           | 59                            | 53                             |
|           | 59                            | 59                             |
| จุดที่ 5  | 74                            | 55                             |
|           | 79                            | 55                             |
|           | 79                            | 59                             |
|           | 62                            | 59                             |
| จุดที่ 6  | 72                            | 55                             |
|           | 68                            | 55                             |
|           | 75                            | 49                             |
|           | 72                            | 59                             |
| ค่าเฉลี่ย | 61.58                         | 54.50                          |

## ก.ม.61+585 (บ้านหนองหิน)

| ตำแหน่ง   | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.) | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.) |
|-----------|-------------------------------|--------------------------------|
| จุดที่ 1  | 51                            | 53                             |
|           | 66                            | 56                             |
|           | 43                            | 54                             |
|           | 50                            | 47                             |
| จุดที่ 2  | 51                            | 57                             |
|           | 62                            | 51                             |
|           | 43                            | 58                             |
|           | 50                            | 47                             |
| จุดที่ 3  | 51                            | 56                             |
|           | 66                            | 45                             |
|           | 53                            | 53                             |
|           | 50                            | 47                             |
| จุดที่ 4  | 57                            | 50                             |
|           | 50                            | 36                             |
|           | 47                            | 40                             |
|           | 48                            | 41                             |
| จุดที่ 5  | 51                            | 45                             |
|           | 49                            | 43                             |
|           | 47                            | 40                             |
|           | 48                            | 41                             |
| จุดที่ 6  | 57                            | 48                             |
|           | 49                            | 43                             |
|           | 47                            | 40                             |
|           | 49                            | 42                             |
| ค่าเฉลี่ย | 51.46                         | 47.21                          |

## ก.ม.59+785 (วัดลาดปลาเค้า)

| ตำแหน่ง   | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.) | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.) |
|-----------|-------------------------------|--------------------------------|
| จุดที่ 1  | 56                            | 36                             |
|           | 51                            | 57                             |
|           | 52                            | 45                             |
|           | 48                            | 35                             |
| จุดที่ 2  | 45                            | 30                             |
|           | 51                            | 46                             |
|           | 50                            | 32                             |
|           | 51                            | 38                             |
| จุดที่ 3  | 55                            | 47                             |
|           | 52                            | 42                             |
|           | 50                            | 46                             |
|           | 48                            | 56                             |
| จุดที่ 4  | 62                            | 41                             |
|           | 52                            | 47                             |
|           | 48                            | 45                             |
|           | 49                            | 48                             |
| จุดที่ 5  | 62                            | 45                             |
|           | 52                            | 47                             |
|           | 53                            | 46                             |
|           | 49                            | 48                             |
| จุดที่ 6  | 62                            | 43                             |
|           | 52                            | 47                             |
|           | 48                            | 45                             |
|           | 49                            | 55                             |
| ค่าเฉลี่ย | 51.96                         | 44.46                          |

## ก.ม.50+174 (วัดธรรมศาลา)

| ตำแหน่ง   | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.) | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.) |
|-----------|-------------------------------|--------------------------------|
| จุดที่ 1  | 81                            | 55                             |
|           | 71                            | 57                             |
|           | 76                            | 75                             |
|           | 70                            | 70                             |
| จุดที่ 2  | 80                            | 65                             |
|           | 74                            | 57                             |
|           | 68                            | 74                             |
|           | 70                            | 70                             |
| จุดที่ 3  | 81                            | 58                             |
|           | 75                            | 57                             |
|           | 77                            | 75                             |
|           | 75                            | 71                             |
| จุดที่ 4  | 83                            | 83                             |
|           | 75                            | 75                             |
|           | 70                            | 70                             |
|           | 72                            | 70                             |
| จุดที่ 5  | 81                            | 80                             |
|           | 75                            | 75                             |
|           | 74                            | 70                             |
|           | 72                            | 67                             |
| จุดที่ 6  | 83                            | 81                             |
|           | 74                            | 73                             |
|           | 70                            | 70                             |
|           | 76                            | 67                             |
| ค่าเฉลี่ย | 75.13                         | 69.38                          |

## ก.ม.47+485 (วัดเสถียร)

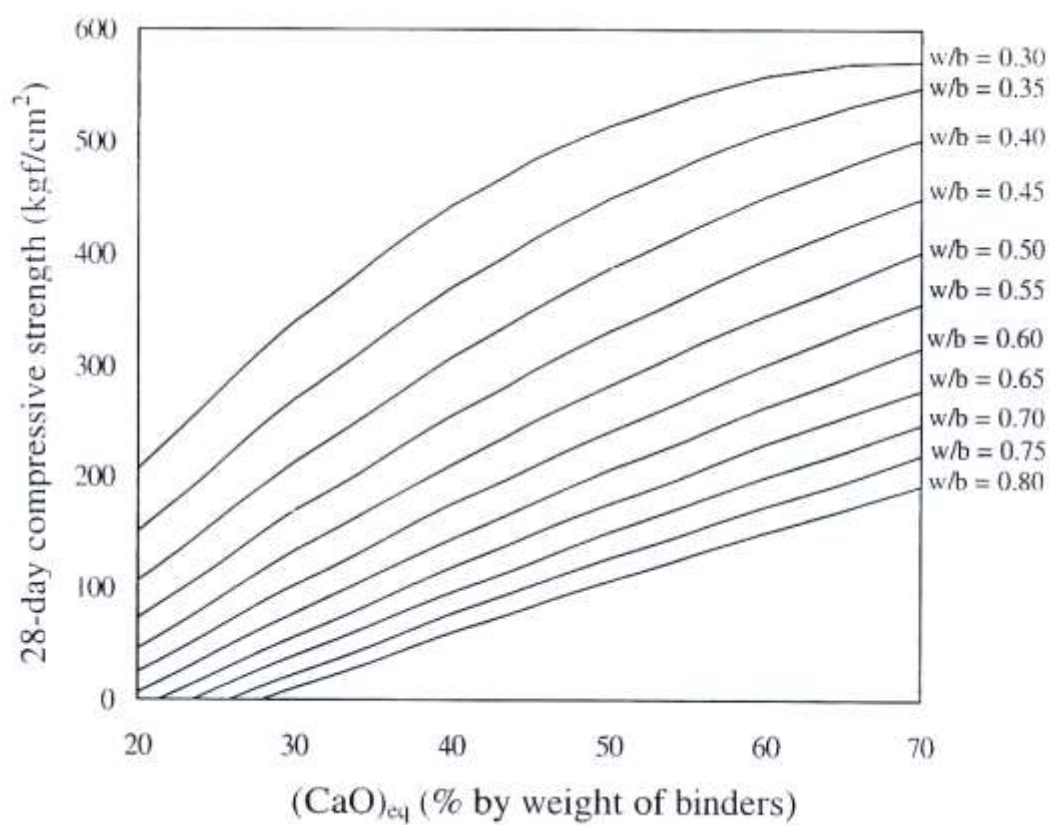
| ตำแหน่ง   | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.) | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.) |
|-----------|-------------------------------|--------------------------------|
| จุดที่ 1  | 58                            | 41                             |
|           | 57                            | 46                             |
|           | 65                            | 46                             |
|           | 62                            | 45                             |
| จุดที่ 2  | 63                            | 69                             |
|           | 66                            | 45                             |
|           | 64                            | 56                             |
|           | 66                            | 49                             |
| จุดที่ 3  | 63                            | 56                             |
|           | 66                            | 54                             |
|           | 64                            | 55                             |
|           | 66                            | 51                             |
| จุดที่ 4  | 60                            | 47                             |
|           | 57                            | 47                             |
|           | 63                            | 54                             |
|           | 62                            | 45                             |
| จุดที่ 5  | 68                            | 63                             |
|           | 66                            | 67                             |
|           | 64                            | 56                             |
|           | 71                            | 49                             |
| จุดที่ 6  | 63                            | 58                             |
|           | 58                            | 54                             |
|           | 64                            | 59                             |
|           | 58                            | 60                             |
| ค่าเฉลี่ย | 63.08                         | 53.00                          |

## ก.ม.45+648 (วัดศิระชะทอง)

| ตำแหน่ง   | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.) | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.) |
|-----------|-------------------------------|--------------------------------|
| จุดที่ 1  | 47                            | 46                             |
|           | 48                            | 40                             |
|           | 50                            | 37                             |
|           | 54                            | 45                             |
| จุดที่ 2  | 47                            | 46                             |
|           | 41                            | 43                             |
|           | 50                            | 39                             |
|           | 57                            | 45                             |
| จุดที่ 3  | 49                            | 46                             |
|           | 48                            | 49                             |
|           | 53                            | 41                             |
|           | 54                            | 51                             |
| จุดที่ 4  | 54                            | 47                             |
|           | 48                            | 45                             |
|           | 50                            | 49                             |
|           | 37                            | 45                             |
| จุดที่ 5  | 47                            | 37                             |
|           | 48                            | 35                             |
|           | 50                            | 56                             |
|           | 54                            | 49                             |
| จุดที่ 6  | 47                            | 39                             |
|           | 45                            | 54                             |
|           | 50                            | 59                             |
|           | 39                            | 49                             |
| ค่าเฉลี่ย | 48.63                         | 45.50                          |

## ก.ม.42+960 (วัดท่าตำหนัก)

| ตำแหน่ง   | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.) | ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.) |
|-----------|-------------------------------|--------------------------------|
| จุดที่ 1  | 58                            | 48                             |
|           | 57                            | 56                             |
|           | 56                            | 60                             |
|           | 70                            | 53                             |
| จุดที่ 2  | 68                            | 51                             |
|           | 53                            | 63                             |
|           | 67                            | 53                             |
|           | 57                            | 45                             |
| จุดที่ 3  | 59                            | 46                             |
|           | 60                            | 49                             |
|           | 70                            | 51                             |
|           | 58                            | 51                             |
| จุดที่ 4  | 59                            | 51                             |
|           | 61                            | 46                             |
|           | 56                            | 51                             |
|           | 59                            | 53                             |
| จุดที่ 5  | 68                            | 51                             |
|           | 55                            | 45                             |
|           | 65                            | 53                             |
|           | 57                            | 47                             |
| จุดที่ 6  | 59                            | 46                             |
|           | 62                            | 49                             |
|           | 71                            | 52                             |
|           | 58                            | 48                             |
| ค่าเฉลี่ย | 60.96                         | 50.75                          |



รูปที่ ก ความสัมพันธ์ของปริมาณแคลเซียมออกไซด์และกำลังอัดที่อายุ 28 วัน  
(สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, 2003) [40]