

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์

4.1 การสำรวจด้วยภาพถ่าย ความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง

4.1.1 รายละเอียดโครงสร้างที่สำรวจความเสียหาย

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างจากสิ่งก่อสร้าง ไม่ว่าจะเป็นอาคาร สะพาน เขื่อน ท่าเรือ หรือ โครงสร้างในลักษณะอื่นๆ ที่ได้ทำการออกแบบไว้โดยกำหนดให้โครงสร้างดังกล่าวสามารถรับแรงกระทำ ที่สูงสุดได้ค่าหนึ่งภายใต้อายุการใช้งานในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าว คือ ช่วงอายุของโครงสร้าง นั้นเอง ในกรณีของอาคารหรือสิ่งปลูกสร้าง ช่วงเวลาดังกล่าวจะหมายถึง ช่วงอายุของอาคารหรือสิ่งปลูก สร้าง สาเหตุที่โครงสร้างมีอายุการใช้งานที่จำกัด เกิดจากการเสื่อมสภาพ และการเสียหายของวัสดุเป็น หลัก ซึ่งสาเหตุของการเสื่อมสภาพและการเสียหายของวัสดุดังกล่าว อาจเกิดจากการผุกร่อนการล้า เนื่องจากการรับน้ำหนักเป็นเวลานาน การรับน้ำหนักที่สูงเกินไปกว่าที่กำหนดไว้ การรับแรงกระทำใน ลักษณะที่ไม่ได้ออกแบบไว้ หรือเกิดจากการเสื่อมสลายจากปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ รวมถึงปัจจัย สิ่งแวดล้อมโดยรอบ เช่น อากาศ ความชื้น ไอทะเล การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เป็นต้น นอกจากสาเหตุ ความเสียหายดังกล่าวข้างต้น อาจเกิดจาก อุบัติภัยต่างๆ เช่น ไฟไหม้แผ่นดินไหว หรือ พายุ ซึ่งทำให้ โครงสร้างเกิดความเสียหาย ก็อาจทำให้ช่วงของอายุของโครงสร้างลดลงอย่างต่อเนื่อง

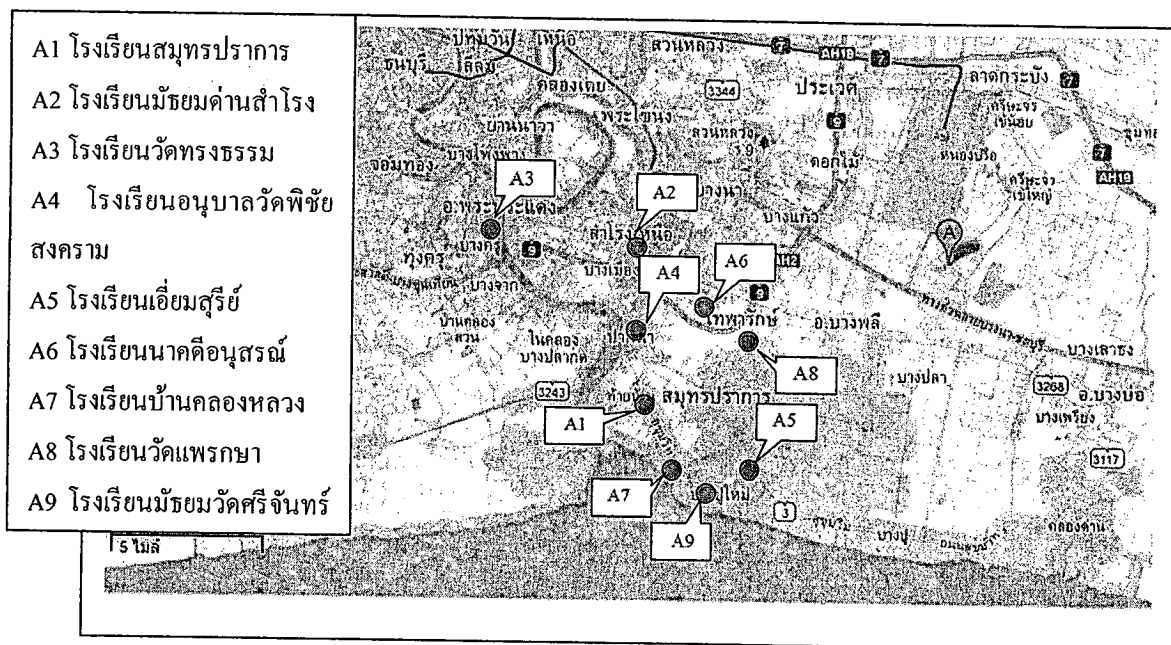
การศึกษาสภาพแวดล้อมของสิ่งปลูกสร้างโดยทั่วไป ของจังหวัดสมุทรปราการ พบว่า ลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบลุ่มทั้งหมด มีแม่น้ำเจ้าพระยา ไหลผ่านทางทิศตะวันตกของจังหวัด จาก ทิศเหนือไปทิศใต้ลงสู่อ่าวไทย มีชายฝั่งทะเลยาว 47.5 กิโลเมตร เนื่องจากจังหวัดสมุทรปราการ เป็น จังหวัดในเขตปริมณฑลเขตติดต่อกับกรุงเทพมหานคร เป็นจังหวัดที่เป็นที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรม จำนวนมาก ซึ่งข้อมูล ณ เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2550 พบว่าจังหวัดสมุทรปราการมีโรงงานอุตสาหกรรม 6,136 แห่ง จังหวัดสมุทรปราการมีจำนวนประชากรอาศัยอยู่หนาแน่น ปัจจุบันจังหวัดสมุทรปราการมี เนื้อที่ 1,004 ตารางกิโลเมตร อาณาเขตทิศเหนือติดต่อกับกรุงเทพมหานคร และจังหวัดฉะเชิงเทรา ทิศ ตะวันออกติดต่อกับจังหวัดฉะเชิงเทรา ทิศใต้จรดอ่าวไทย ทิศตะวันตกติดต่อกับกรุงเทพมหานคร (<http://th.wikipedia.org/>) และยังพบว่าโครงสร้างอาคารต่างๆ ในเขตพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการ มี อายุการใช้งาน การเสื่อมสภาพของโครงสร้าง เนื่องจากสภาพอากาศและสิ่งแวดล้อมดังกล่าว

ตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 แสดงรายละเอียดที่ตั้งตำแหน่งของโรงเรียนในเขตจังหวัด สมุทรปราการ ที่ใช้เป็นอาคารในการศึกษาในครั้งนี้

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของตำแหน่งที่ตั้งของอาคารโรงเรียนที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้

โครงสร้าง	อายุ (ปี)	ระยะทาง จากถนน (ม.)	ระยะทางจาก แม่น้ำเจ้าพระยา (ม.)	ละติจูด (N)	ลองจิจูด (E)
A1 โรงเรียนสมุทรปราการ	44	130	670	13°32'21.00"	100°37'10.89"
A2 โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง	30	30	4,200	13°38'51.54"	100°35'55.74"
A3 โรงเรียนวัดทรงธรรม	29	20	50	13°30'11.08"	100°11'25.74"
A4 โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม	20	8	111	13°35'46.24"	100°35'49.73"
A5 โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์	16	90	675	13°31'19.03"	100°39'29.15"
A6 โรงเรียนนาคดีอนุสรณ์	14	75	2,300	13°34'41.34"	100°39'13.91"
A7 โรงเรียนบ้านคลองหลวง	10	96	2,150	13°33'51.57"	100°36'29.27"
A8 โรงเรียนวัดแพรกษา	5	8	4,850	13°34'20.97"	100°38'20.92"
A9 โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์	5	55	344	13°31'16.23"	100°38'37.82"

*อายุโครงสร้างนับจากวันที่ก่อสร้างแล้วเสร็จจนถึงวันที่ตรวจสอบโครงสร้าง (พ.ศ.2555)



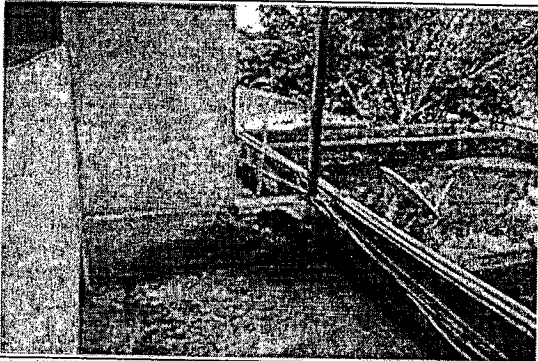
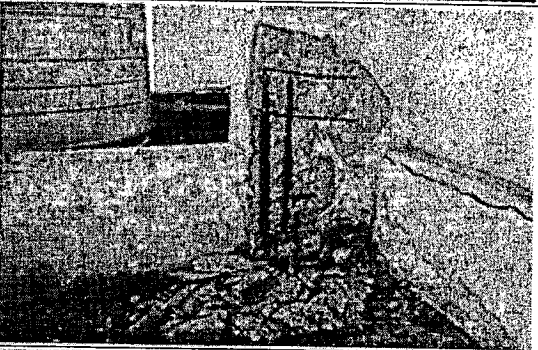
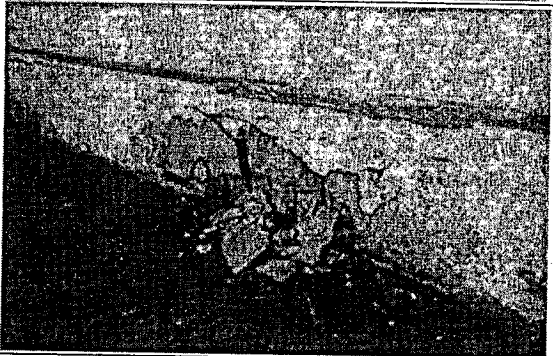
รูปที่ 4.1 แผนที่แสดงตำแหน่งของโครงสร้างอาคารเรียนที่ตรวจสอบ

4.1.2 การตรวจพินิจ

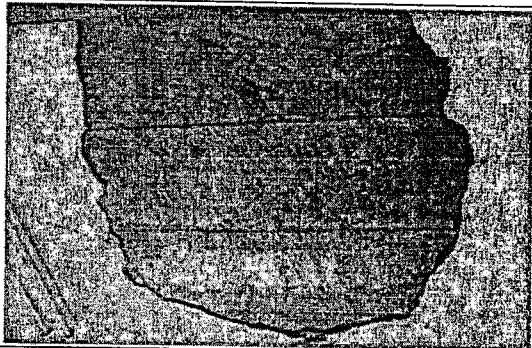
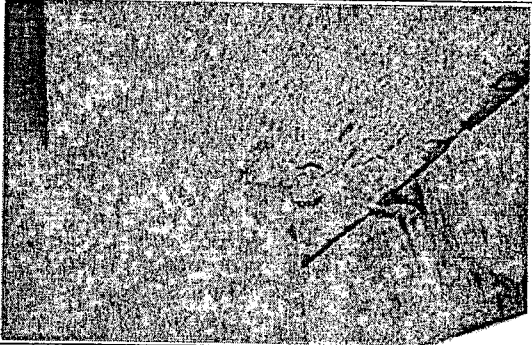
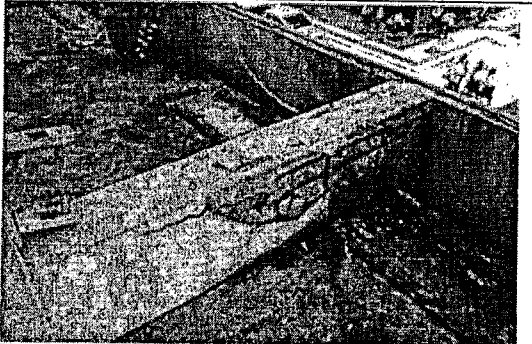
การตรวจสอบเบื้องต้นโดยใช้วิธีตรวจสอบด้วยสายตา พบว่าปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมส่วนใหญ่ มักเกิดบริเวณคานคอดิน คานบริเวณกันสาดและพื้นใต้กันสาด ซึ่งสาเหตุหลักเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของแผ่นกันซึม ระบบระบายน้ำไม่มีการบำรุงรักษาทำให้น้ำขัง ส่วนในบริเวณอื่นๆ ที่พบมักเกิดจากการมีระยะหุ้มเหล็กน้อยเกินไป

ลักษณะและสาเหตุของความเสียหายของโครงสร้าง ที่พบในอาคารเรียน สามารถสรุปความเสียหายของโครงสร้างดังกล่าวตามตารางที่ 4.3 ถึงตารางที่ 4.11

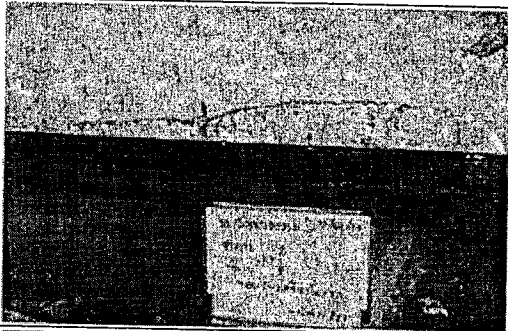
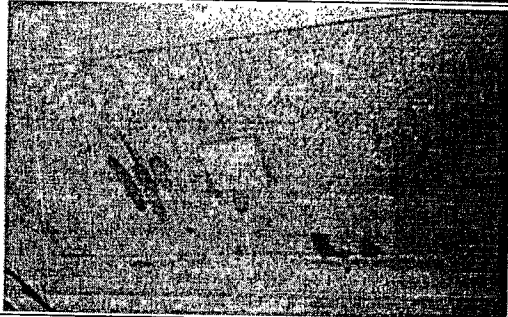
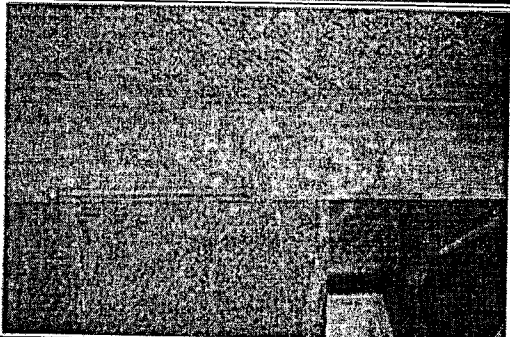
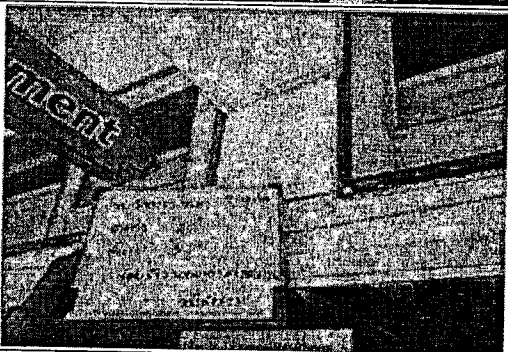
ตารางที่ 4.3 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างอาคารเรียน A1 โรงเรียนสมุทรปราการ (อาคาร 1) เป็นอาคารเรียน 3 ชั้น สร้างแล้วเสร็จ เมื่อปี พ.ศ. 2511

ลักษณะของความเสียหาย	
	โครงสร้างคานแตกร้าวและการหลุดร่อนของชั้นปูนฉาบบริเวณส่วนต่อคาน
	การแตกร้าวและการหลุดร่อนของชั้นปูนฉาบบริเวณเสาและคาน
	การแตกร้าวและการหลุดร่อนของชั้นปูนฉาบบริเวณคาน

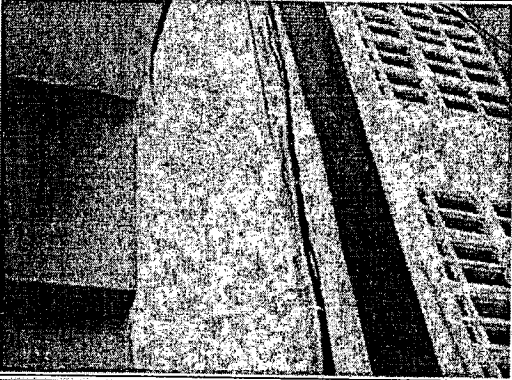
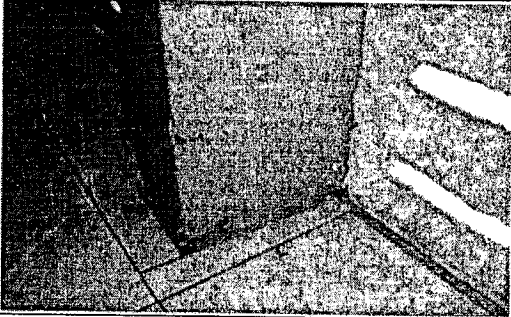
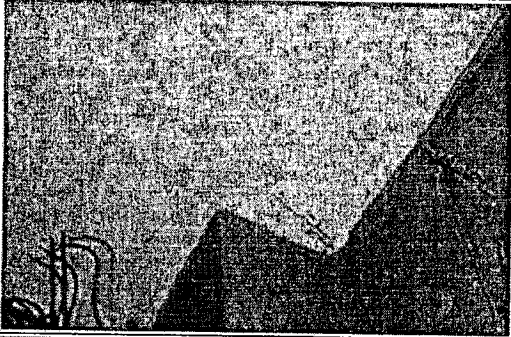
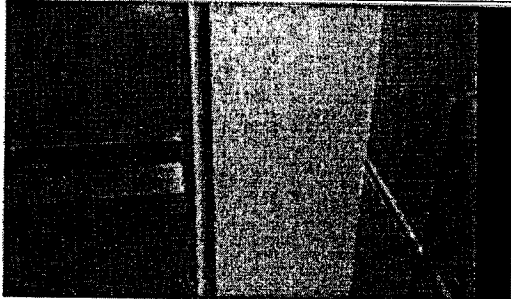
ตารางที่ 4.4 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างอาคารเรียน A2 โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง (อาคาร 2) เป็นอาคารเรียน 4 ชั้น แบบ พ531 สร้างปี พ.ศ. 2523 และต่อเติม พ.ศ. 2525

ลักษณะของความเสียหาย	
	เกิดการหลุดร่อนปูนฉาบผิวเพดานชั้นดาดฟ้าเนื่องจากปูนฉาบเสื่อมสภาพ
	ท้องพื้นกันสาดกะเทาะเนื่องจากเหล็กเสริมเกิดสนิม
	เหล็กเสริมภายในเกิดสนิม คอนกรีตหลุดร่อน
	การหลุดร่อนของปูนฉาบเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิม ได้พื้นโถงบันไดและห้องน้ำ

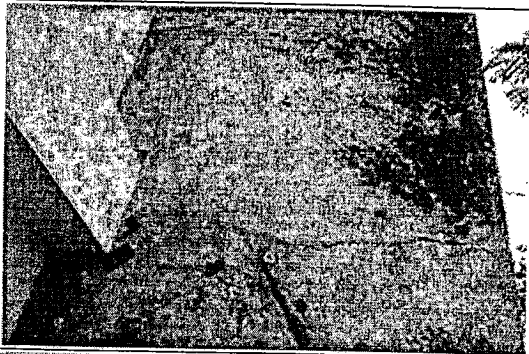
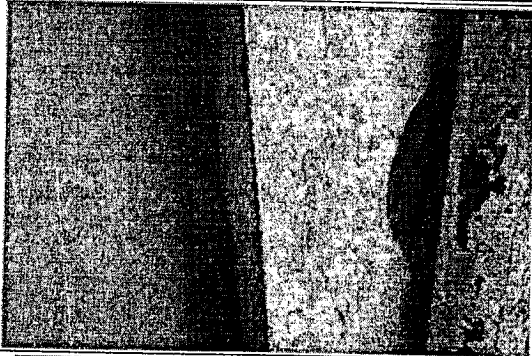
ตารางที่ 4.5 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างอาคารเรียน A3 โรงเรียนวัดทรงธรรม (อาคาร 2) เป็นอาคารเรียน 4 ชั้น แบบ พ531 สร้างปี พ.ศ. 2523 และต่อเติม พ.ศ. 2525

ลักษณะของความเสียหาย	
	ครีบก้นสาดเกิดรอยร้าว
	การหลุดร่อนของปูนฉาบเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิม ฝ้าปูนฉาบในห้องเรียน
	คานรับบันไดเกิดรอยร้าว
	รอยต่อระหว่างเสาและคานเกิดรอยแตกร้าวผิวปูนฉาบ

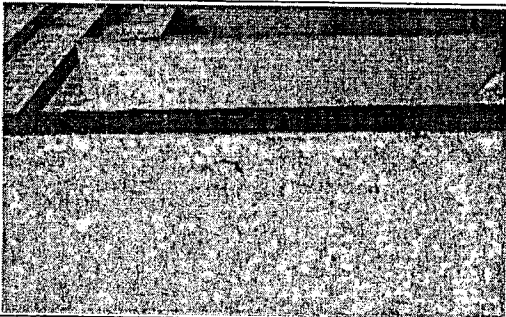
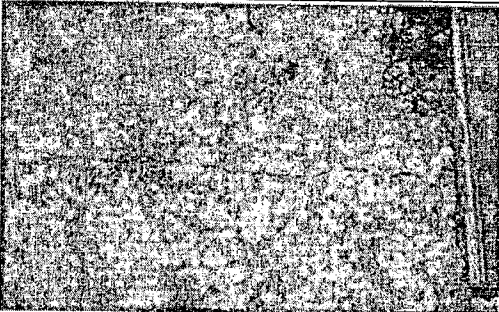
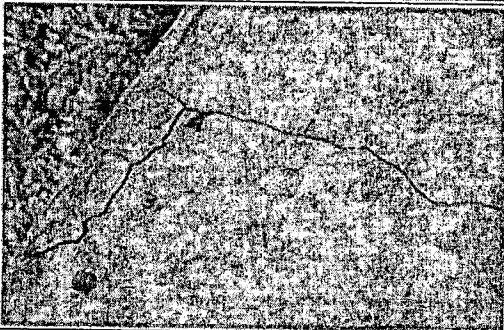
ตารางที่ 4.6 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างอาคารเรียน A4 โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม (อาคาร 4) เป็นอาคารเรียน 4 ชั้น 12 ห้องเรียน แบบ สปช. 2/28 สร้างแล้วเสร็จ ปี พ.ศ. 2535

ลักษณะของความเสียหาย	
	รอยแตกร้าวผนังด้านนอก
	รอยแตกร้าวของเสา
	รอยแตกร้าวพื้น
	รอยแตกร้าวปูนฉาบเสา

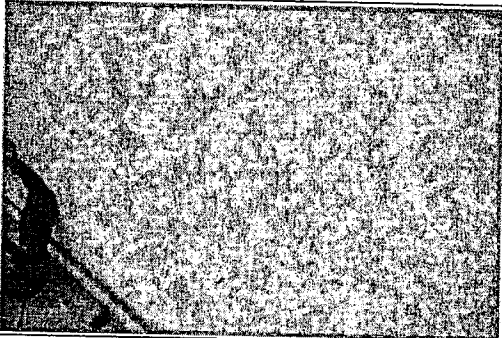
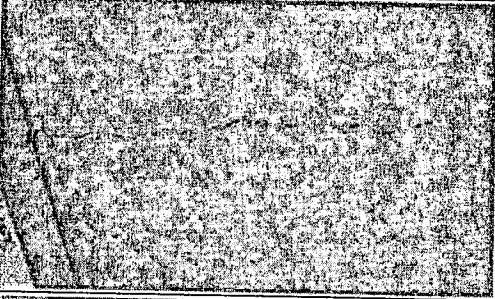
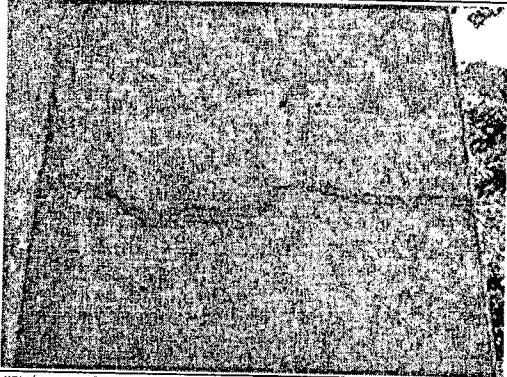
ตารางที่ 4.7 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างอาคารเรียน A5 โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์ (อาคาร 2) อาคารเรียน 4 ชั้น สร้างแล้วเสร็จ ปี พ.ศ. 2541

ลักษณะของความเสียหาย	
	รอยแตกร้าวพื้นกันสาดเกิดจากการหดตัวของโครงสร้าง
	ผิวปูนฉาบหลุดร่อนเกิดจากการทรุดตัวของพื้นชั้น 1
	ผิวปูนฉาบหลุดร่อนเกิดจากการทรุดตัวของพื้นชั้น 1
	สภาพของเหล็กเสริมด้านในเป็นสนิม

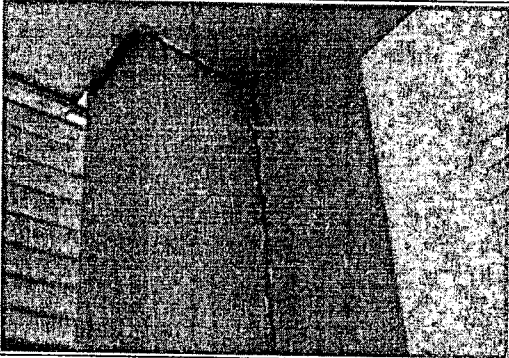
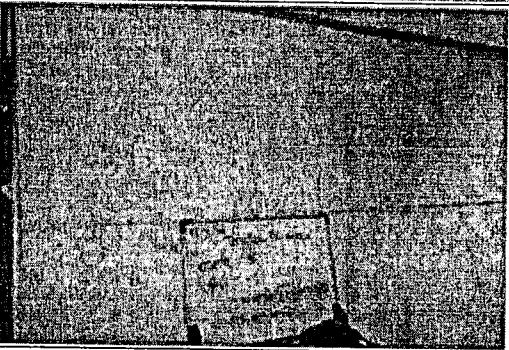
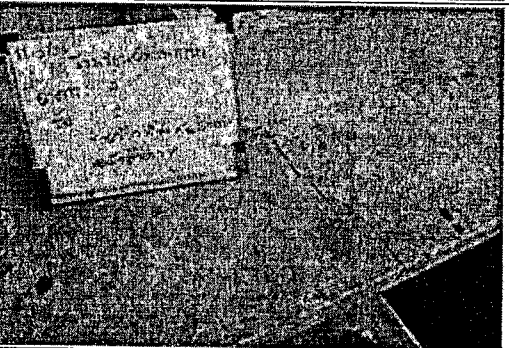
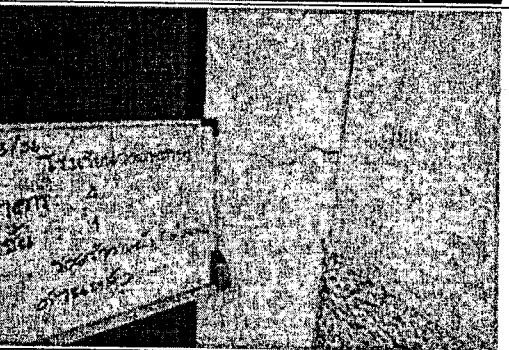
ตารางที่ 4.8 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างอาคารเรียน A6 โรงเรียนนาคตื่อนุสรณ์ (อาคาร 1) เป็นอาคารเรียน 4 ชั้น สร้างแล้วเสร็จ ปี พ.ศ. 2546

ลักษณะของความเสียหาย	
	การซึมของน้ำ ความชื้น บริเวณใต้พื้นกีดสาด
	เกิดรอยแตกร้าวพื้นกันสาด
	รอยแตกร้าวพื้นกันสาดเกิดจากการหดตัวของโครงสร้าง
	เกิดจากการหดตัวของพื้น

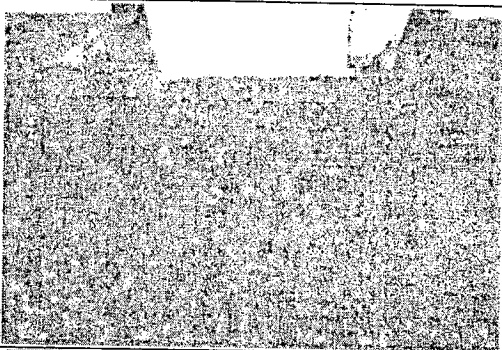
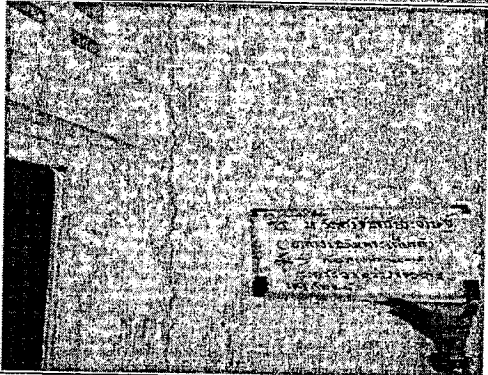
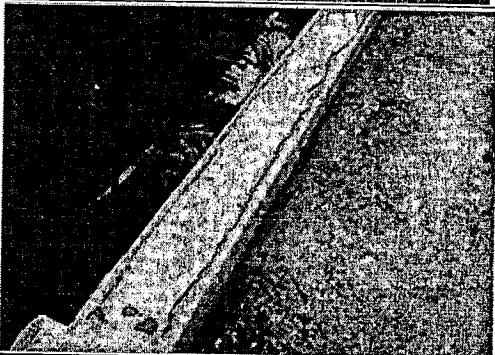
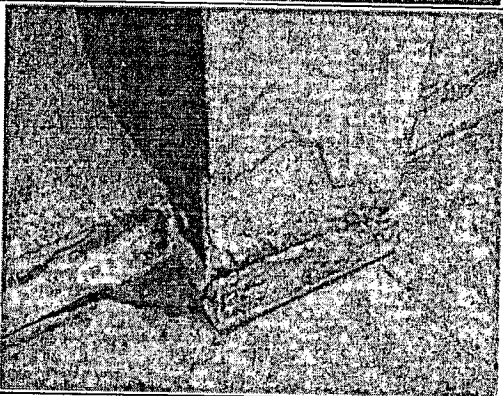
ตารางที่ 4.9 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างอาคารเรียน A7 โรงเรียนบ้านคลองหลวง (อาคารเฉลิมพระเกียรติ) อาคารเรียน 3 ชั้น 12 ห้องเรียน แบบ สปช. 2/28 สร้าง ปี พ.ศ. 2547 แล้วเสร็จ ปี พ.ศ. 2548

ลักษณะของความเสียหาย	
	ผนังปูนฉาบเกิดรอยร้าวแตกกระจาย
	รอยแตกกว้างพื่นกันสาด
	รอยแตกกว้างเสา
	เนื้อคอนกรีตข้างในมีแต่หิน เป็นโพรง

ตารางที่ 4.10 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างอาคาร A8 โรงเรียนวัดแพรกษา (อาคารเทศบาล) เป็นอาคารเรียน 4 ชั้น สร้างแล้วเสร็จ ปี พ.ศ. 2551

ลักษณะของความเสียหาย	
	การแตกร้าวชั้นปูนฉาบบริเวณส่วนต่อระหว่างเสาจริงกับเสาก่อ
	ผิวปูนฉาบโครงสร้างคานแตกฉาบบริเวณด้านนอกอาคาร
	รอยแตกร้าวพื้นกันสาดเกิดจากการหดตัวของโครงสร้าง
	รอยแตกร้าวเสาเกิดจากการหดตัวของโครงสร้างเนื่องจากเป็นส่วนต่อเติม

ตารางที่ 4.11 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างอาคาร A9 โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์
 ประดิษฐ์ (อาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา) เป็นอาคารเรียน 3 ชั้น สร้างแล้วเสร็จ ปี พ.ศ. 2550

ลักษณะของความเสียหาย	
	เกิดรอยแตกร้าวพื้นกันสาด เกิดจากการหดตัวของ โครงสร้าง
	รอยต่อโครงสร้างอาคารเกิดรอยร้าว
	ผิวปูนฉาบหลุดร่อนสาเหตุจากปูนฉาบไม่ดีพอหรือ ฉาบบางเกินไป
	ผิวปูนฉาบหลุดร่อนเกิดจากการหดตัวของพื้นชั้น 1

4.1.3 สรุปความเสียหายที่พบจากการตรวจสอบอาคารโรงเรียนที่ศึกษา

ความเสียหายที่พบในอาคารเรียน จากตารางที่ 4.12 พบว่า A1 อาคารโรงเรียนสมุทรปราการ และ A2 อาคารโรงเรียนมัธยมด่านสำโรงจะพบปัญหาการแตกร้าวของผิวปูนฉาบโครงสร้าง การหลุดร่อนของชั้นปูนฉาบ และพบปัญหาการเกิดสนิมของโครงสร้างอาคารเรียน A1 และ A2 ได้อย่างชัดเจน และอาคารเรียน A2 มีปัญหาเรื่องของคานกันสาด พื้นใต้กันสาดเป็นสนิมเกือบทุกชั้น

ปัญหาของอาคารเรียนอื่นมีบ้างแต่ส่วนน้อยหรือไม่สามารถตรวจสอบได้เนื่องจากมีการซ่อมบำรุง มีการทาสีใหม่ เนื่องจากหน่วยงานราชการจะมีงบประมาณซ่อมเกือบทุกปี

ตารางที่ 4.12 สรุปสภาพความเสียหายที่พบในโครงสร้างอาคารเรียน

ความเสียหายที่พบ / โครงสร้าง	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
การแตกร้าวในองค์อาคารรับแรง	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย
การแตกร้าวของผิวอาคารด้านนอก	มาก	มาก	น้อย	น้อย	ปานกลาง	น้อย	น้อย	มาก	น้อย
การหลุดร่อนของชั้นปูนฉาบ	มาก	มาก	มาก	น้อย	ปานกลาง	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย
ปัญหาการเกิดสนิมและการกะเทาะของคอนกรีตหุ้มเหล็ก	มาก	มาก	มาก	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย
น้ำฝนรั่วซึมเข้าในอาคาร	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย
การหลุดร่อนของสี	มาก	มาก	มาก	มาก	มาก	มาก	มาก	น้อย	มาก

หมายเหตุ น้อย หมายถึง จำนวนความเสียหายน้อยกว่า 15 จุดใน

ปานกลาง หมายถึง จำนวนความเสียหายมากกว่า 15 จุด แต่น้อยกว่า 30 จุด

มาก หมายถึง จำนวนความเสียหายมากกว่า 30 จุด

การจำแนกระดับความเสียหายของแต่ละโครงสร้างในตารางที่ 4.12 นั้นเป็นการจำแนกระดับเฉลี่ย โดยให้ความสำคัญความเสียหายแต่ละจุดเท่ากัน และให้ความสำคัญกับจำนวนจุดที่เกิดความเสียหายเป็นตัวแปรหลักในการจำแนกระดับ อย่างไรก็ตามจากผลการตรวจสอบพบว่าความเสียหายที่รุนแรงมักจะอยู่ในอาคารที่มีจำนวนความเสียหายประเภทดังกล่าวมาก ด้วยเหตุนี้การจำแนกระดับด้วยจำนวนจึงมีความสัมพันธ์ทางอ้อมกับความรุนแรงของความเสียหายแต่ละประเภทในแต่ละโครงสร้างด้วย

4.2 การทดสอบแบบไม่ทำลายและการเจาะเก็บตัวอย่าง

4.2.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตด้วยวิธี Rebound Hammer Test

จากการกระจายตัวของค่า Rebound Number สามารถคำนวณค่ากำลังอัดเฉลี่ยตามความสัมพันธ์ของสมการ (JSCE) [9] ได้ค่าดังตารางที่ 4.13 พบว่าค่ากำลังอัดเฉลี่ยของโครงสร้างอาคารเรียน ไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้เนื่องจาก

- 1) อายุการใช้งานของโครงสร้างที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลทำให้คอนกรีตที่ก่อสร้างก่อนเกิดการเสื่อมสภาพมากกว่าโครงสร้างที่ก่อสร้างภายหลัง
- 2) สภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน คือ มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีผลทำให้คอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะแวดล้อมได้เร็วขึ้น
- 3) คุณภาพของคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้าง
- 4) ขั้นตอนและการควบคุมขณะการก่อสร้าง

การทดสอบโดยใช้เครื่องมือรีบา운드แฮมเมอร์ แท้จริงแล้ว เป็นการทดสอบความแข็งของผิวหน้าคอนกรีต สามารถวัดความแข็งของผิวหน้าได้ลึกไม่เกิน 30 มม. [30-31] สำหรับกรณีที่คอนกรีตสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และมีความชื้นที่เหมาะสม จะทำให้เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น (Carbonation) ทำลายความเป็นต่างของเนื้อคอนกรีตโดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ในคอนกรีต จะทำปฏิกิริยากับ CO_2 และได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซึ่งทำให้เนื้อคอนกรีตบริเวณผิวหน้ามีความแน่นยิ่งขึ้น และส่งผลให้ความแข็งของผิวหน้าของคอนกรีตสูงขึ้นไปด้วย [32]

ในการทดสอบกำลังอัด ด้วยเครื่องมือรีบา운드แฮมเมอร์ จะมีความอ่อนไหวต่อปัจจัยจากจุดทดสอบเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการทดสอบใกล้บริเวณที่มีหินภายในคอนกรีต หรือแม้แต่การทดสอบบริเวณใต้ผิวคอนกรีตมีเหล็กเสริม ซึ่งทำให้แสดงค่าการสะท้อนกลับสูงกว่าปกติถึงกว่าร้อยละ 30 เทียบกับบริเวณที่เป็นคอนกรีตปกติ [33] ซึ่งสอดคล้องกับค่าการกระจายตัว Rebound Number

แต่อย่างไรก็ตามกำลังอัดที่ได้จากความสัมพันธ์ของ JSCE ของโครงสร้างที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด มีการใช้ค่าการกระจายตัวของ Rebound Number ที่ทดสอบซึ่งบางครั้งก็อาจจะทำให้การบ่งบอกผลด้านกำลังอัดและคุณภาพของคอนกรีตไม่ชัดเจนยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้พบว่าค่ากำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ยมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ออกแบบมาตรฐานที่กำหนดไว้คือ 240 กก./ซม.²

จากตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.3 พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลกำลังอัดมีค่ามาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้

- 1) ความผิดพลาดของเครื่องมือวัดกำลังอัด
- 2) ความผิดพลาดเนื่องจากการอ่านค่ากำลังอัด

จากสองสาเหตุดังกล่าวนี้ทำให้ความผิดพลาดของข้อมูลกำลังอัดดังกล่าวเกิดการสะสม จึงเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลกำลังอัดมีค่ามาก นอกจากนี้ยังพบอีกว่าคอนกรีตที่

เกิดการบอบเน้นจะมีความพรุนน้อยลง เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลิตผลจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชันจะช่วยอุดช่องว่างส่วนหนึ่งในคอนกรีต ทำให้แนวโน้มของค่ากำลังอัดจาก Schmidt Hammer มีค่าเพิ่มมากขึ้น ตลอดจนคอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นตามอายุการใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามในขนาดช่วงหน้า ความสึกกร่อนบอบเน้นจะเพิ่มขึ้นตามอายุการใช้งานจนถึงเหล็กเสริมภายในคอนกรีต มีผลทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมจนทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ ซึ่งอาจจะมีผลทำให้กำลังอัดลดน้อยลงแตกต่างกันไป

ในขณะเดียวกันสามารถนำค่าที่ได้จากกำลังอัด (JSCE) ไปหาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานได้ โดยอาศัยกราฟในรูปที่ 4.2 เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์แคลเซียมออกไซด์และกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ซึ่งแกน x ของกราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์แคลเซียมออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ กัน แกน y ด้านซ้ายของกราฟแสดงค่ากำลังอัดที่ต่าง ๆ กัน และแกน y ด้านขวาของกราฟแสดงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

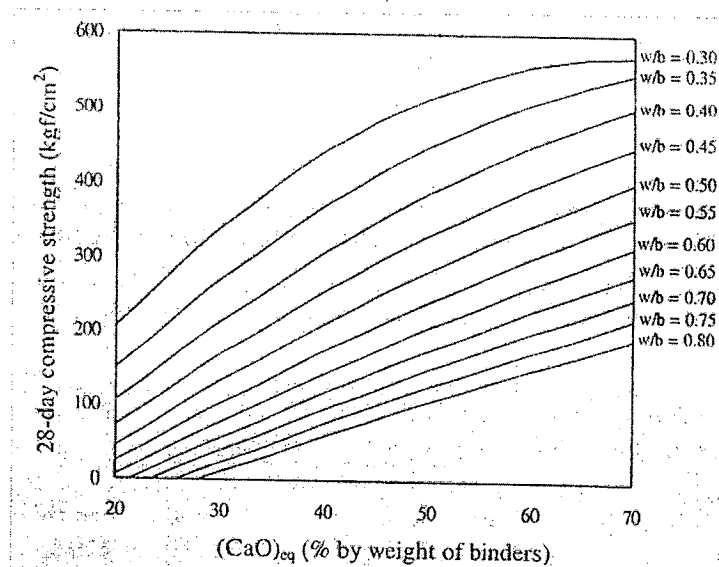
สำหรับโครงสร้างอาคารเรียน มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 [27] ในการก่อสร้าง จึงทำให้เราสามารถทราบปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ได้ ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 63 ถึง-68 ส่วนกำลังอัดก็หาได้จากความสัมพันธ์ของ JSCE จากนั้นก็หาจุดตัดของค่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์และกำลังอัด ก็จะสามารถทราบค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานได้ แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 กำลังอัดเฉลี่ยที่ได้จากความสัมพันธ์ Japan Society of Civil Engineers (JSCE) และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของอาคารเรียน

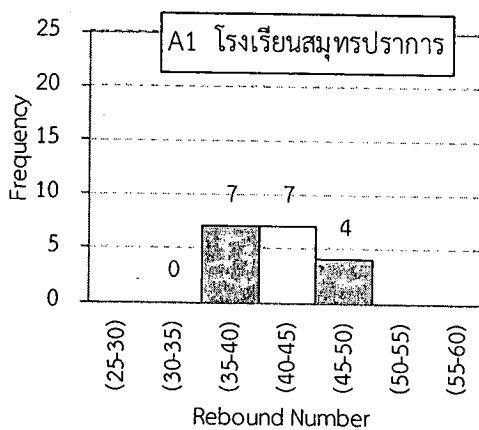
โครงสร้าง	อายุโครงสร้าง		f _c ' จาก Schmidt Hammer		w/b
	ปี	เดือน	กก./ชม. ²	S.D.	
A1 โรงเรียนสมุทรปราการ	44	528	346.3	44.0	0.54
A2 โรงเรียนวัดด่านสำโรง	30	360	324.8	43.2	0.56
A3 โรงเรียนวัดทรงธรรม	29	348	310.7	22.4	0.58
A4 โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม	20	240	310.0	12.4	0.58
A5 โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์	16	192	295.8	31.7	0.6
A6 โรงเรียนนาคตอนุสรณ์	14	168	299.3	23.1	0.59
A7โรงเรียนบ้านคลองหลวง	10	120	295.2	19.3	0.61
A8โรงเรียนวัดแพรกษา	5	60	283.2	27.2	0.62
A9โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์ประดิษฐ์	5	60	282.1	10.0	0.62

S.D. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

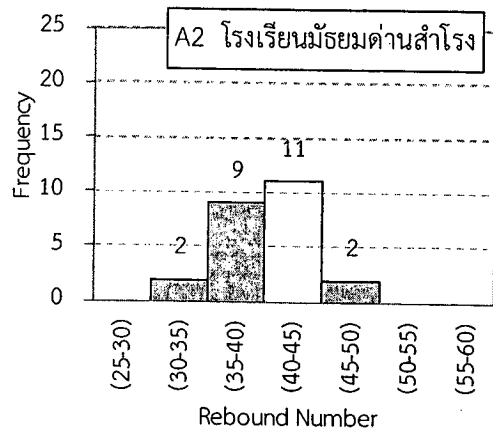
w/b อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน



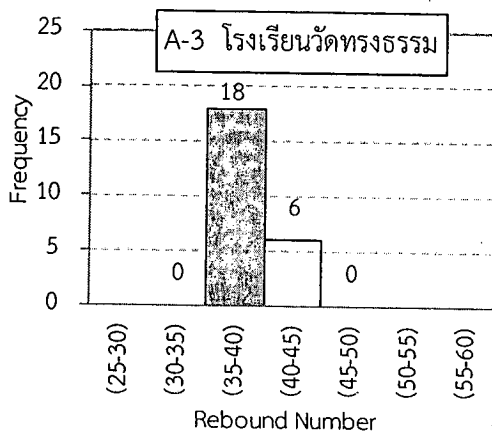
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของปริมาณแคลเซียมออกไซด์และกำลังอัดที่อายุ 28 วัน
(สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, 2003) [34]



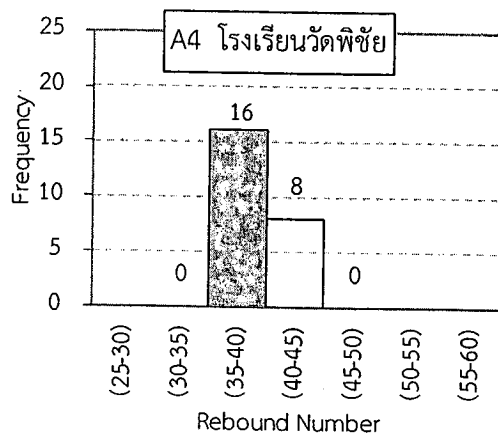
ก) โรงเรียนสมุทรปราการ



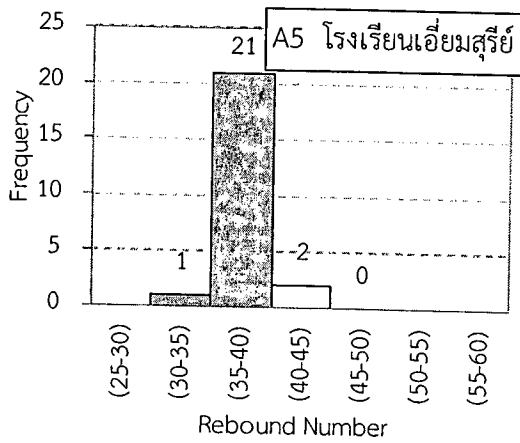
ข) โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง



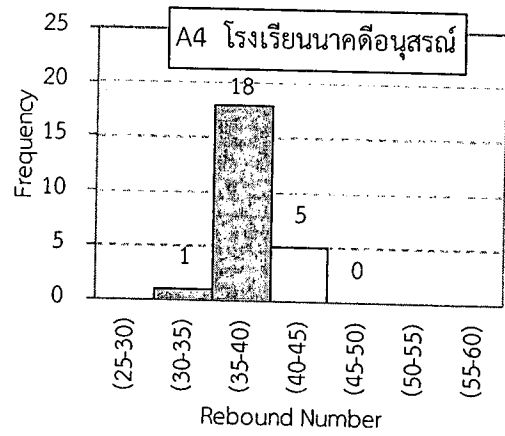
ค) โรงเรียนวัดทรงธรรม



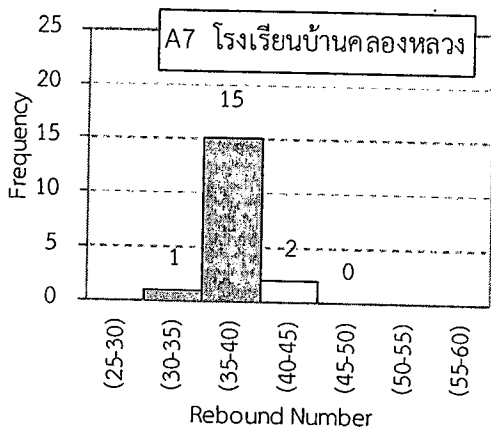
ง) โรงเรียนวัดพิชัย



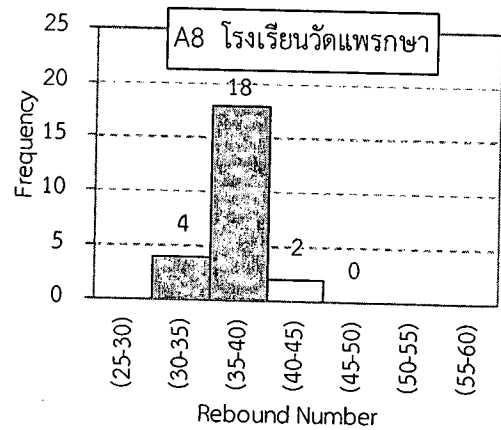
จ) โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์



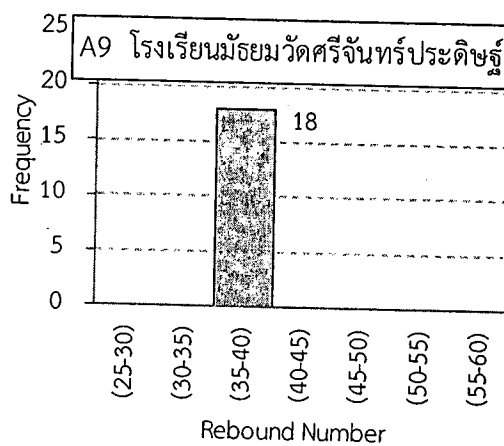
ณ) โรงเรียนนาคดีอนุสรณ์



ข) โรงเรียนบ้านคลองหลวง



ช) โรงเรียนวัดแพรกษา



ณ) โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์ประดิษฐ์

รูปที่ 4.3 ค่าการกระจายตัวของการสะท้อนที่วัดได้จากโครงสร้างอาคารเรียนที่ศึกษา

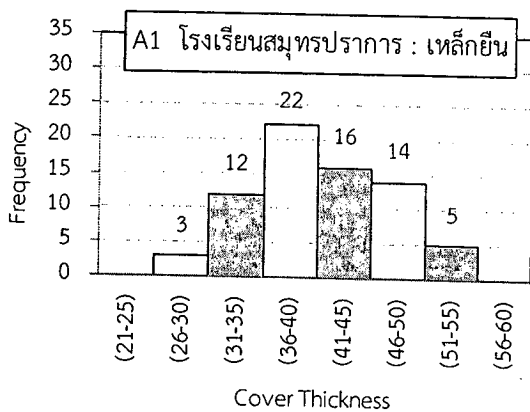
4.2.2 การวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก

ในส่วนของการวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก ดังตารางที่ 4.14 พบว่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเฉลี่ยที่ได้มีค่ามากกว่า 25 มิลลิเมตร ทุกโครงสร้าง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยมากกว่าค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่กำหนดไว้ คือโครงสร้างที่ไม่สัมผัสกับดินต้องมีระยะหุ้มเหล็กที่ 25 มม. แสดงให้เห็นว่าระบบการควบคุมการก่อสร้างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งจะสามารถช่วยชะลอคาร์บอนชั้นที่จะเข้าไปถึงตำแหน่งเหล็กเสริมจนทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมลดต่ำลงใกล้หรือต่ำกว่าระดับวิกฤต

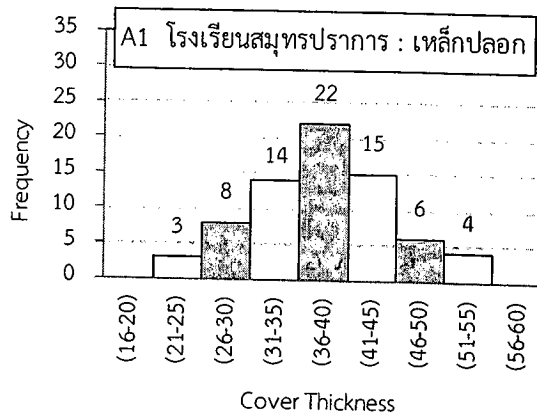
สำหรับในรูปที่ 4.4 ถึง 4.12 แสดงค่าการกระจายตัวคอนกรีตหุ้มเหล็กยื่นและเหล็กปลอกของโครงสร้างอาคารเรียน 9 แห่ง ซึ่งมีการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) เช่นกัน

ตารางที่ 4.14 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กและปฏิกิริยาเฉลี่ยของอาคารเรียนที่ศึกษา

โครงสร้าง	ระยะปูนฉาบ		ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก (covering)			
	ระยะเฉลี่ย (มม.)	S.D.	เหล็กยื่น		เหล็กปลอก	
			ระยะเฉลี่ย (มม.)	S.D.	ระยะเฉลี่ย (มม.)	S.D.
A1	14	1.6	41	6.0	38	7.1
A2	14	1.4	40	7.7	38	7.7
A3	16	1.7	41	7.1	39	8.8
A4	14	1.9	44	5.4	41	5.9
A5	13	4.5	45	6.4	43	6.9
A6	15	1.5	47	6.9	44	7.2
A7	15	0.9	44	6.3	41	5.8
A8	18	1.6	54	8.1	52	9.6
A9	15	1.4	53	8.1	52	10.4

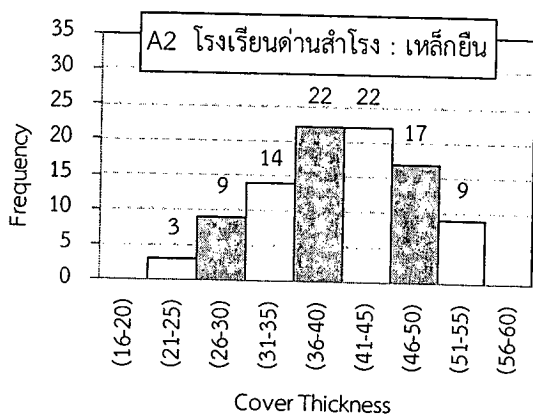


ก) เหล็กยื่น

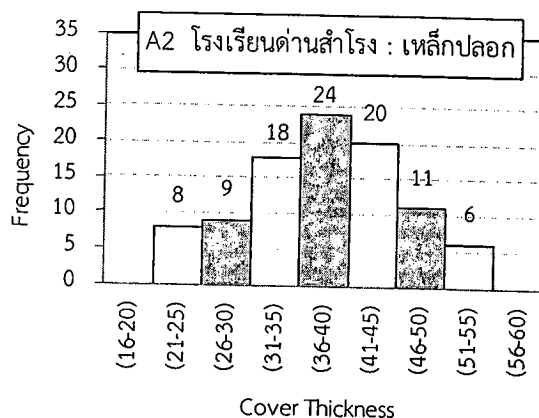


ข) เหล็กปลูก

รูปที่ 4.4 ค่าการกระจายตัวของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคาร A1 โรงเรียนสมุทรปราการ

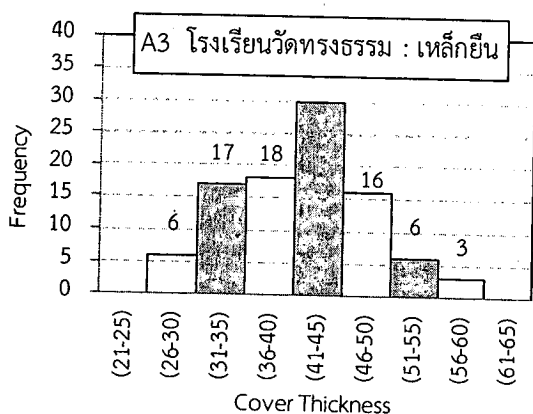


ก) เหล็กยื่น

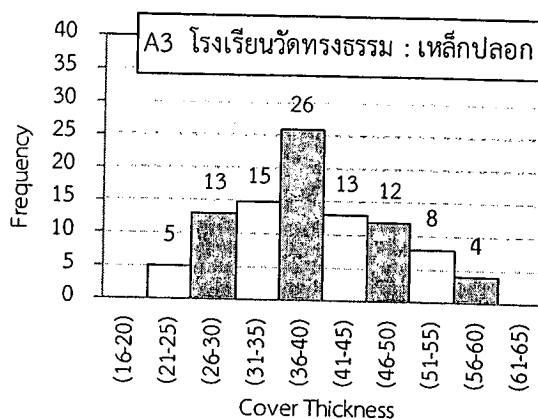


ข) เหล็กปลูก

รูปที่ 4.5 ค่าการกระจายตัวของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคาร A2 โรงเรียนด่านสำโรง

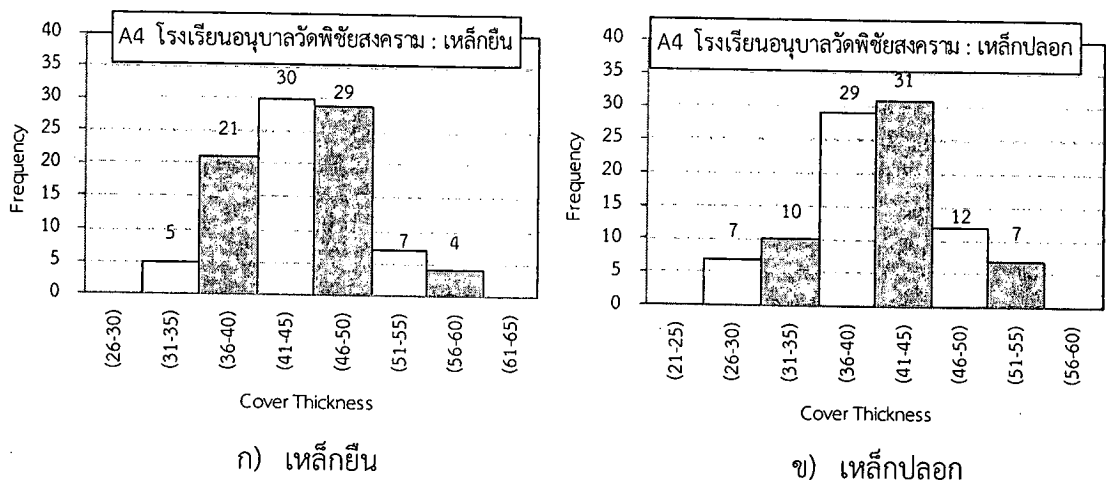


ก) เหล็กยื่น

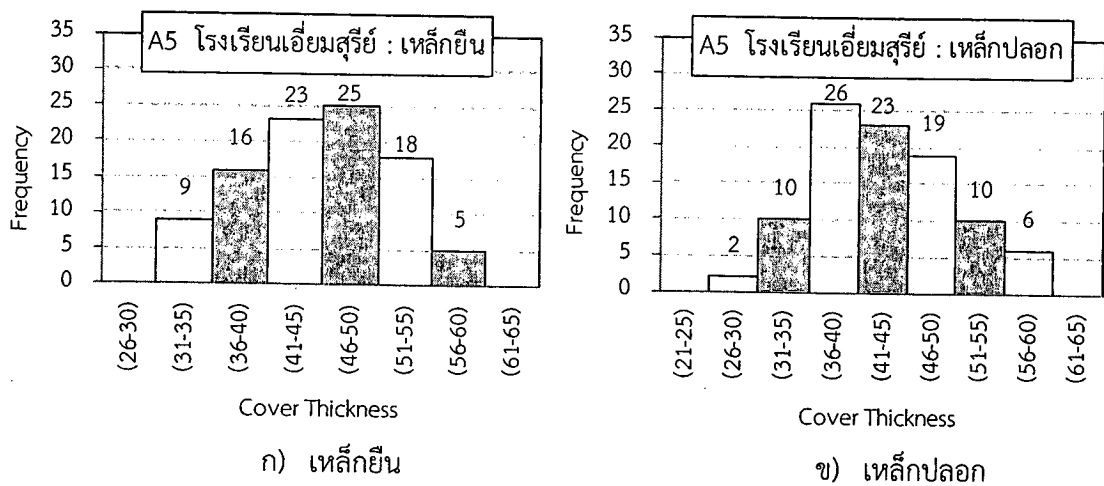


ข) เหล็กปลูก

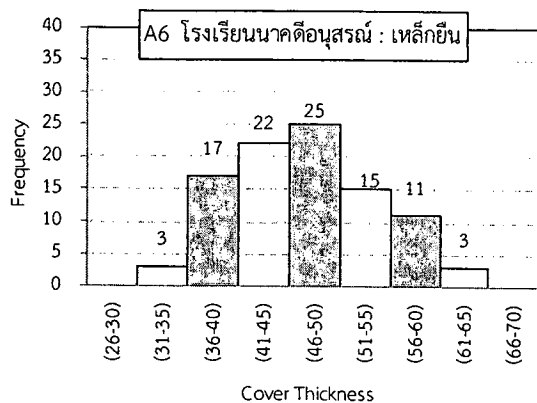
รูปที่ 4.6 ค่าการกระจายตัวของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคาร A3 โรงเรียนวัดทรงธรรม



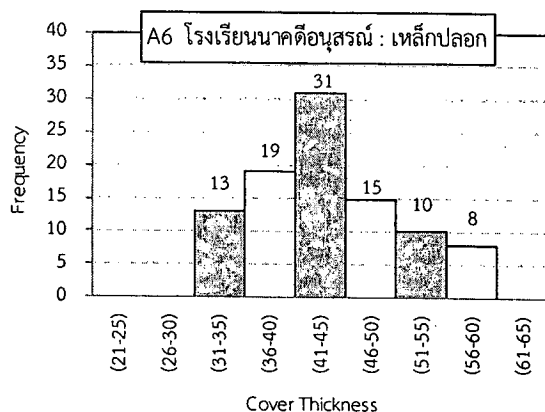
รูปที่ 4.7 ค่าการกระจายตัวของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคาร A5 โรงเรียนวัดพิชัยสงคราม



รูปที่ 4.8 ค่าการกระจายตัวของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคาร A5 โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์

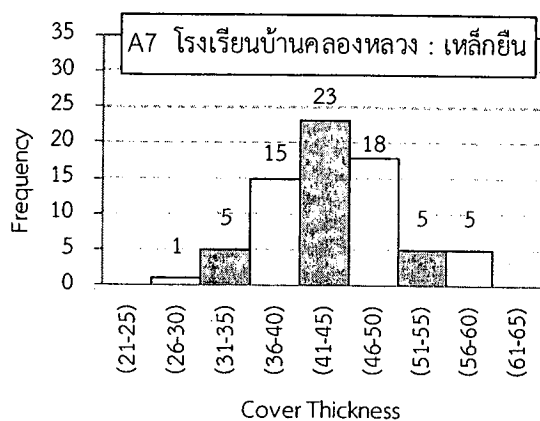


ก) เหล็กยี่น

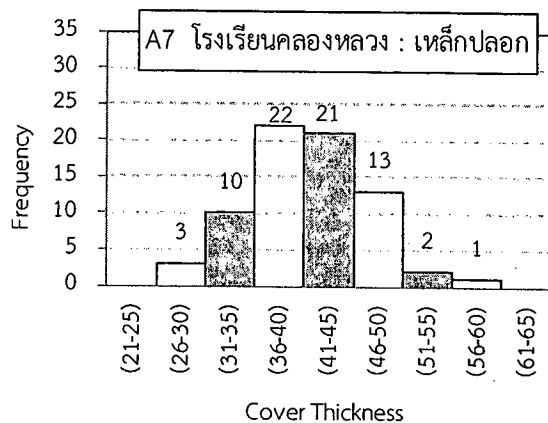


ข) เหล็กปลอก

รูปที่ 4.9 ค่าการกระจายตัวของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคาร A6 โรงเรียนนาคดีอนุสรณ์

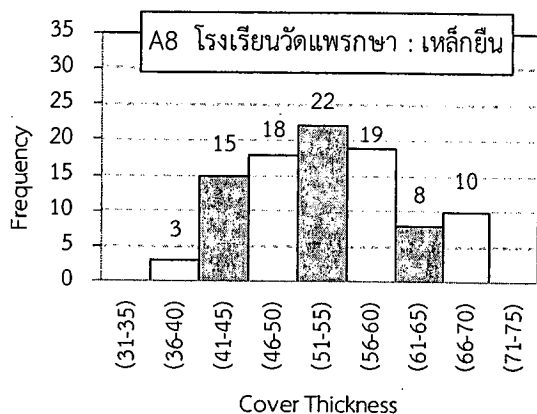


ก) เหล็กยี่น

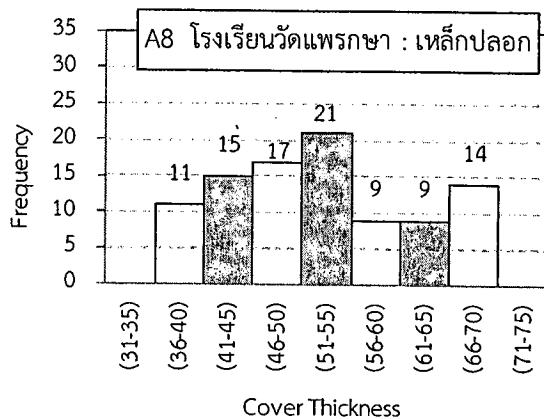


ข) เหล็กปลอก

รูปที่ 4.10 ค่าการกระจายตัวของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคาร A7 โรงเรียนบ้านคลองหลวง

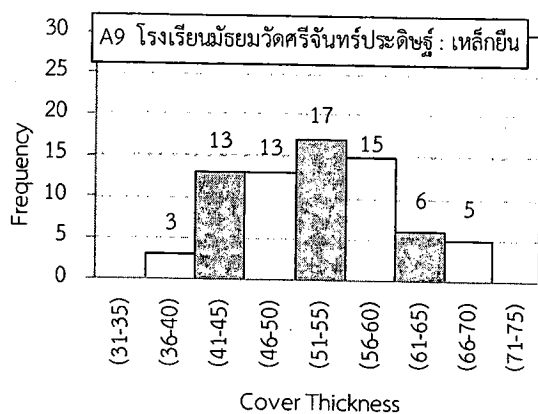


ก) เหล็กยี่น

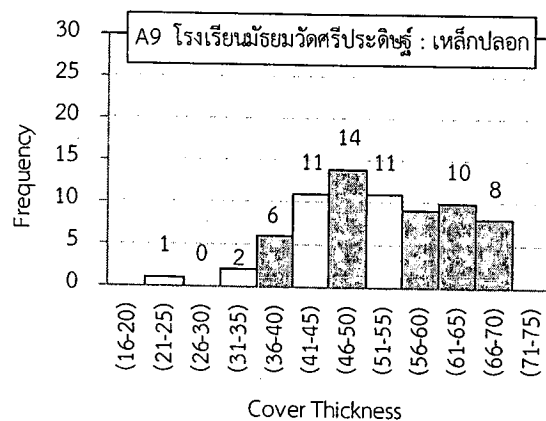


ข) เหล็กปลอก

รูปที่ 4.11 ค่าการกระจายตัวของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคาร A8 โรงเรียนวัดแพรกษา



ก) เหล็กยี่น



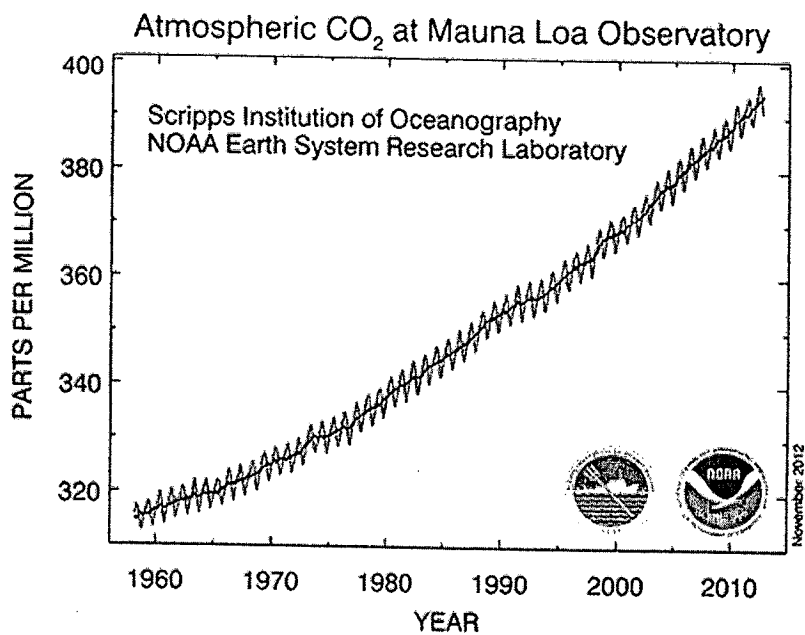
ข) เหล็กปลูก

รูปที่ 4.12 ค่าการกระจายตัวของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคาร A9 โรงเรียนมัธยมวัดศรีประดิษฐ์

4.2.3 ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

ในส่วน of ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.15 เป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้การพัฒนาความลึกคาร์บอนขึ้นเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แต่ในภาพรวมแล้วความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในโครงสร้างอาคารทั้ง 9 แห่ง มีความเข้มข้นที่สูงพอๆ กัน เพราะโครงสร้างอาคารที่เลือกในการศึกษาครั้งนี้ มีภาวะความเสี่ยงต่อการเกิดคาร์บอนขึ้นที่ชัดเจน ในส่วนของความชื้นสัมพัทธ์พบว่ามีย้อยละความชื้นสัมพัทธ์มีค่าแตกต่างกัน โดยความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่มีค่าอยู่ระหว่างกึ่งชื้นกึ่งแห้ง (Semi-dry) คือ ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึง 60 จะเป็นปัจจัยที่ทำให้คอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความคงทนเกี่ยวกับคาร์บอนขึ้นได้เร็วขึ้น

อย่างไรก็ตามปัจจุบันปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี ดังแสดงในรูปที่ 4.13 โดยตารางที่ 4.15 แสดงปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมของข้อมูลในช่วงเวลาหนึ่งที่ทำการทดลองเท่านั้น (พ .ศ.2554) ซึ่งในอนาคตข้อมูลความเข้มข้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ สมควรที่จะศึกษาในอนาคตต่อไป



เส้นสีแดง แทนปริมาณ CO₂ ค่าเฉลี่ยรายเดือน
เส้นสีดำ แทนปริมาณ CO₂ หลังการคำนวณตามฤดูกาลเฉลี่ย

รูปที่ 4.13 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปีโดย NOAA [28]

ตารางที่ 4.15 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ของสิ่งแวดล้อม
อาคารเรียน

โครงสร้าง	อายุ โครงสร้าง (เดือน)	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)		ความชื้นสัมพัทธ์ (RH)	
		ความเข้มข้น เฉลี่ย (ppm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ร้อยละเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
A1	528	606.42	39.12	48.15	6.66
A2	360	580.44	20.73	52.95	6.84
A3	348	580.08	27.32	46.22	9.82
A4	240	626.58	69.25	60.95	5.49
A5	192	581.14	19.56	63.04	7.50
A6	168	580.44	14.05	63.29	5.68
A7	120	595.53	14.55	56.83	6.52
A8	60	594.39	45.11	65.04	4.24
A9	60	583.86	14.42	61.39	5.30

4.2.4 ความลึกคาร์บอนชั้น

จากอายุของโครงสร้างและความลึกคาร์บอนชั้น (ตารางที่ 4.16) สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นได้จากสมการ

$$d = k\sqrt{t} \quad (4.1)$$

อ้างอิงจาก J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul, T. Leelawat, 2006

โดยที่ d คือ ค่าความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น (มม./เดือน^{1/2})

t คือ อายุของโครงสร้าง(เดือน)

เมื่อพิจารณาโครงสร้างทั้ง 9 แห่ง พบว่าโครงสร้างที่มีอายุน้อย จะมีแนวโน้มที่ความลึกของคาร์บอนชั้นน้อยกว่าโครงสร้างที่มีอายุมาก เนื่องจากสภาวะความคงทนของคอนกรีตมีการถูกทำลายสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นผลทำให้ความลึกคาร์บอนชั้นมีระยะที่เพิ่มมากขึ้นไปด้วย ซึ่งจากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น สามารถรวบรวมปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดคาร์บอนชั้นได้ดังต่อไปนี้

- 1) อายุของโครงสร้างแตกต่างกัน
- 2) สภาวะแวดล้อมและการใช้งานที่แตกต่างกัน
- 3) คุณภาพของคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้าง

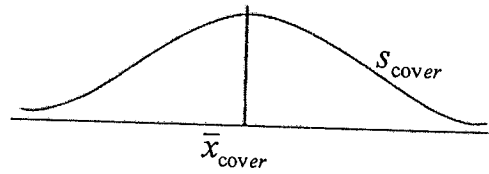
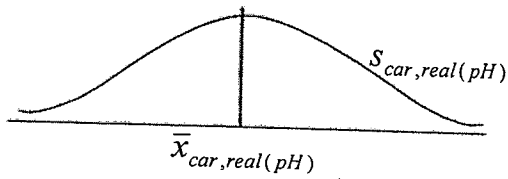
จากปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนชั้น แต่อาจจะมีปัจจัยด้านอื่นๆ ที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนชั้นอยู่บ้างในระดับที่น้อย เช่น ทิศทางลม สภาพอากาศ เป็นต้น ซึ่งถือว่าปัจจัยส่วนนี้ถูกรอบคลุมจากปัจจัยหลักของการเกิดคาร์บอนชั้นอยู่แล้ว แต่ปัจจัยส่วนหนึ่งที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัด คือ สภาวะแวดล้อม ซึ่งเป็นปัจจัยที่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ในอนาคตข้างหน้า ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น (k) ก็อาจมีการเปลี่ยนแปลง เพราะฉะนั้นการศึกษาถึงค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น อย่างต่อเนื่องในอนาคต จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของคาร์บอนชั้นเกิดความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

ตารางที่ 4.16 ความลึกคาร์บอนชั้นเฉลี่ย และสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นของโครงสร้างอาคารเรียนที่
ศึกษา

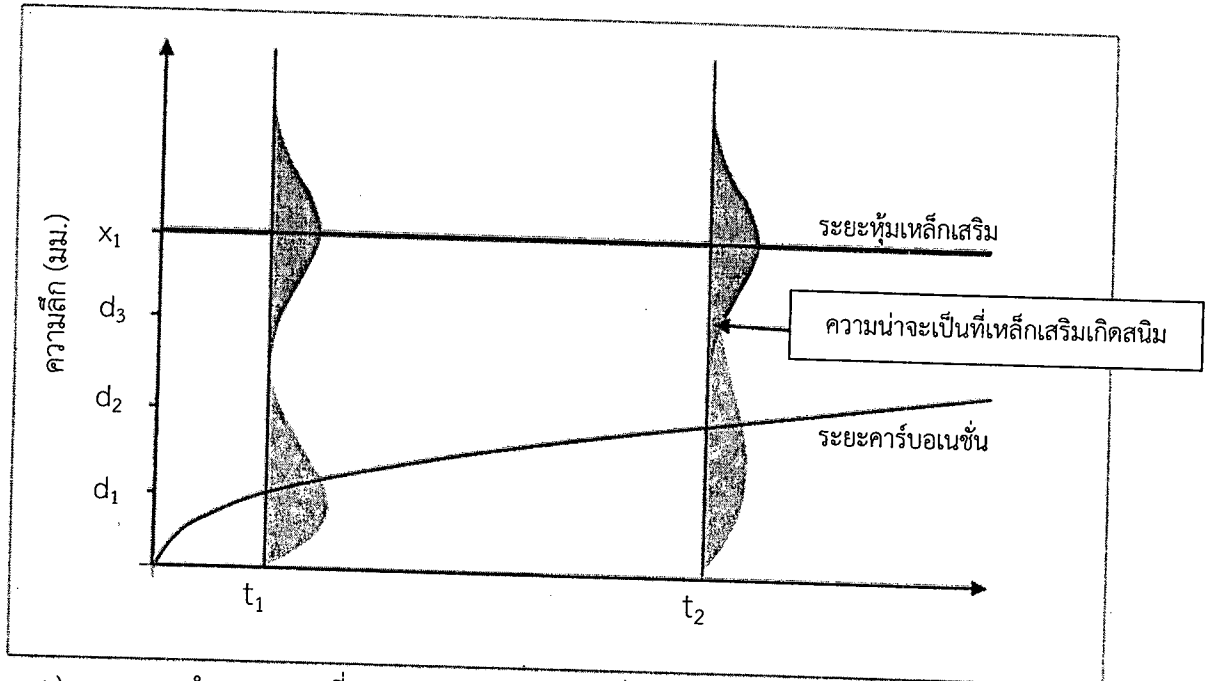
โครงสร้าง	อายุ โครงสร้าง (เดือน)	ระยะความลึกคาร์บอนชั้น		สัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น	
		ความลึก เฉลี่ย(มม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	k (มม./เดือน ^{1/2})	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
A1	528	38.4	7.74	1.67	0.34
A2	360	32.5	6.24	1.71	0.33
A3	348	32.2	4.56	1.73	0.24
A4	240	27.2	3.41	1.76	0.22
A5	192	31.8	4.40	2.29	0.32
A6	168	28.2	3.77	2.18	0.29
A7	120	25.8	2.87	2.35	0.26
A8	60	27.7	1.71	3.57	0.22
A9	60	27.6	2.68	3.56	0.35

4.3 การประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

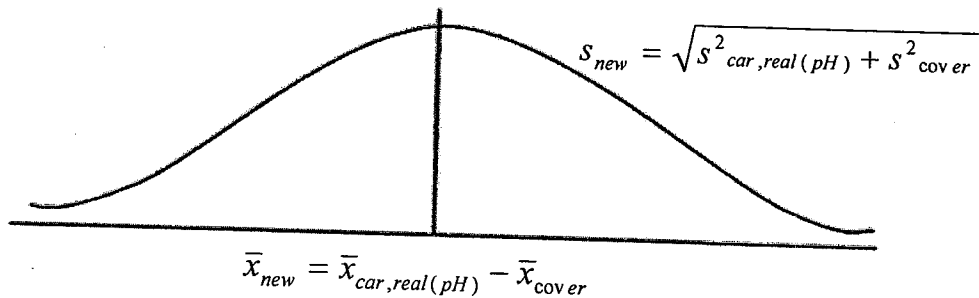
จากรูปที่ 4.14 (ก) แสดงแบบจำลองโค้งปกติของความลึกคาร์บอนชั้นและระยะหุ้มเหล็กเสริมซึ่งข้อมูลทั้งสองเป็นอิสระต่อกัน จากนั้นเมื่ออายุโครงสร้างมากขึ้น ความสัมพันธ์ของโค้งปกติของความลึกคาร์บอนชั้นจะซ้อนทับโค้งปกติของระยะหุ้มเหล็กเสริม ทำให้โค้งปกติของข้อมูลทั้งสองเกิดส่วนที่ซ้อนทับกันขึ้น ดังแสดงในรูปที่รูปที่ 4.14 (ข) ซึ่งเป็นการแสดงแบบจำลองความเสี่ยงที่เหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีโอกาสเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นโดยการแปรผันตามอายุของโครงสร้าง ซึ่งรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ความน่าจะเป็นของระยะหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ย x_1 จะมีค่าคงที่ตลอดอายุการใช้งาน ในขณะที่พื้นที่ความน่าจะเป็นของความลึกคาร์บอนชั้นจะเพิ่มขึ้นทุกช่วงอายุการใช้งานจาก d_1 ไป d_2 หรือ d_3 เป็นต้น จนกระทั่ง ณ ช่วงอายุหนึ่งของโครงสร้าง ความน่าจะเป็นของความลึกคาร์บอนชั้นจะซ้อนทับกับความน่าจะเป็นของระยะหุ้มเหล็กเสริม ซึ่งส่วนที่ซ้อนทับก็คือความเสี่ยงที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น จากการซ้อนทับของระยะหุ้มเหล็กเสริมและความลึกคาร์บอนชั้นทำให้เกิดค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตัวใหม่ของข้อมูลความลึกคาร์บอนชั้นและระยะหุ้มเหล็กเสริม ซึ่งแสดงออกมาในรูปที่ 4.14 (ค)



ก) แผนภาพจำลองโค้งปกติของความลึกคาร์บอนเนชั่นและระยะหุ้มเหล็กเสริม



ข) แผนภาพจำลองความเสี่ยงของความลึกคาร์บอนเนชั่นและระยะหุ้มเหล็กเสริมที่มีการแปรผันตามอายุโครงสร้าง [25]



ค) แผนภาพจำลองโค้งปกติที่เกิดจากการซ้อนทับของความลึกคาร์บอนเนชั่นและระยะหุ้มเหล็กเสริม
รูปที่ 4.14 แผนภาพแสดงกลไกความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นตามหลักความน่าจะเป็นทางสถิติ

จากข้อมูลในตารางที่ 4.14 และ 4.16 สามารถทำการวิเคราะห์ความเสี่ยงที่เหล็กเสริมจะมีโอกาสเกิดสนิมตามอายุต่างๆของโครงสร้างได้ โดยประยุกต์หลักทางสถิติเกี่ยวกับการแจกแจงความ

น่าจะเป็นต่อเนื่อง [11] ทำการวิเคราะห์ตามแบบจำลองรูปที่ 4.14 ก) ข) และ ค) อาศัยความสัมพันธ์ของการแจกแจงของผลต่างค่าเฉลี่ยของระยะหุ้มเหล็กเสริมและความลึกคาร์บอนชั้น โดยความลึกคาร์บอนชั้นที่จะนำมาสร้างความสัมพันธ์วิเคราะห์ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นจะมีการบวกระยะเพิ่มเข้าไป 10 มิลลิเมตร ทุกระยะคาร์บอนชั้นที่วัดได้จากโครงสร้างตามมาตรฐาน JSCE (2006) [26] ที่ระบุไว้ว่าระยะคาร์บอนชั้นที่วัดระยะจากโครงสร้างโดยการฉีดสารละลายฟีนอล์ฟธาเลินไปยังตัวอย่างคอนกรีตนั้น สารละลายฟีนอล์ฟธาเลินจะมีการเปลี่ยนสีที่ค่า pH ประมาณ 9.2 แต่ในทางทฤษฎี พบว่าโอกาสที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิมจะมีค่ามากกว่าค่า pH ที่ 9.2 ซึ่งอยู่ระหว่างค่า pH ที่ 9.2-13 ดังนั้นมาตรฐาน JSCE จึงมีการบวกความลึกคาร์บอนชั้นเพิ่มไปอีก 10 มิลลิเมตร เพื่อความปลอดภัยของโครงสร้าง ดังสมการที่ (4.3) โดยสมการที่ (4.2) คือสมการพื้นฐานของการหาความลึกคาร์บอนชั้น

$$x_{car,real} = k\sqrt{t_0} \quad (4.2)$$

$$x_{car,real(pH)} = k\sqrt{t} + 10 \quad (4.3)$$

โดยที่ $x_{car,real}$ คือความลึกคาร์บอนชั้นที่วัดได้จากโครงสร้าง ณ อายุที่ทำการทดสอบ (มม.)

$x_{car,real(pH)}$ คือความลึกคาร์บอนชั้นที่มีการบวกเพิ่ม 10 มม.ตามมาตรฐาน JSCE

k คือค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น (มม./เดือน^{1/2})

t_0 คืออายุของโครงสร้าง ณ เวลาที่ทำการทดสอบความลึกคาร์บอนชั้น (เดือน)

t คืออายุของโครงสร้างที่ต้องการวิเคราะห์ (เดือน)

จากแผนภาพจำลองความเสี่ยงที่เหล็กเสริมเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นดังแสดงใน รูปที่ 4.14 ก) ข) และ ค) ต้องมีการหาตัวแปรที่จะนำไปวิเคราะห์ตามหลักสถิติเพื่อหาความเสี่ยงที่เหล็กเสริมเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น ประกอบด้วย

1) ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะหุ้มเหล็กเสริม โดยสมมติให้ค่าทั้งสองค่าดังกล่าวคงที่ตลอดอายุการใช้งาน

2) ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของความลึกคาร์บอนชั้นจะมีการวิเคราะห์ค่าดังกล่าวแตกต่างกันคือ ให้ค่าเฉลี่ยของความลึกคาร์บอนชั้นจะมีการแปรผันตามเวลาของอายุโครงสร้าง สำหรับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความลึกคาร์บอนชั้นเฉลี่ยจะสมมติให้คงที่ตลอดอายุการใช้งาน หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรสุ่มปกติ มาตรฐานของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นโดยอาศัยสมการที่ (4.4) ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นผลของ ช่วงอายุโดยอายุหนึ่งของโครงสร้างเท่านั้น เพราะฉะนั้นถ้าต้องการให้ตัวแปรสุ่มปกติมาตรฐานอายุโครงสร้างที่มีการแปรผันไปตามเวลา จึงจำเป็นต้องอาศัยสมการที่ (4.3) ที่มีตัวแปรเกี่ยวกับอายุโครงสร้างอยู่ด้วย สำหรับที่จะทำการแปรผันอายุโครงสร้างให้ได้ค่าความ

ลิกคาร์บอนเนชั่นที่อายุโครงสร้างต่างๆ กัน จึงทำให้ค่าตัวแปรสุ่มปกติมาตรฐานของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นที่ได้หลากหลายอายุมากยิ่งขึ้น (สมการ 4.4)

$$Z = \frac{(\bar{x}_{car,real(pH)} - \bar{x}_{cover}) - (0)}{\sqrt{s_{car,real}^2 + s_{cover}^2}} \quad (4.4)$$

โดย Z คือ ค่าตัวแปรสุ่มปกติมาตรฐาน (นำไปเปิดตารางพื้นที่ใต้โค้ง) ของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น

0 คือ สมมติค่าผลต่างของข้อมูลความลิกคาร์บอนเนชั่นเฉลี่ยและระยะหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ยที่ทำให้เหล็กเสริมมีโอกาสเกิดสนิม $\bar{x}_{car,real(pH)} > \bar{x}_{cover}$

$\bar{x}_{cover}$ คือ ระยะหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ย (มม.)

$\bar{x}_{car,real(pH)}$ คือ ความลิกคาร์บอนเนชั่นเฉลี่ยที่มีการบวกเพิ่ม 10 มม. ตามมาตรฐาน JSCE

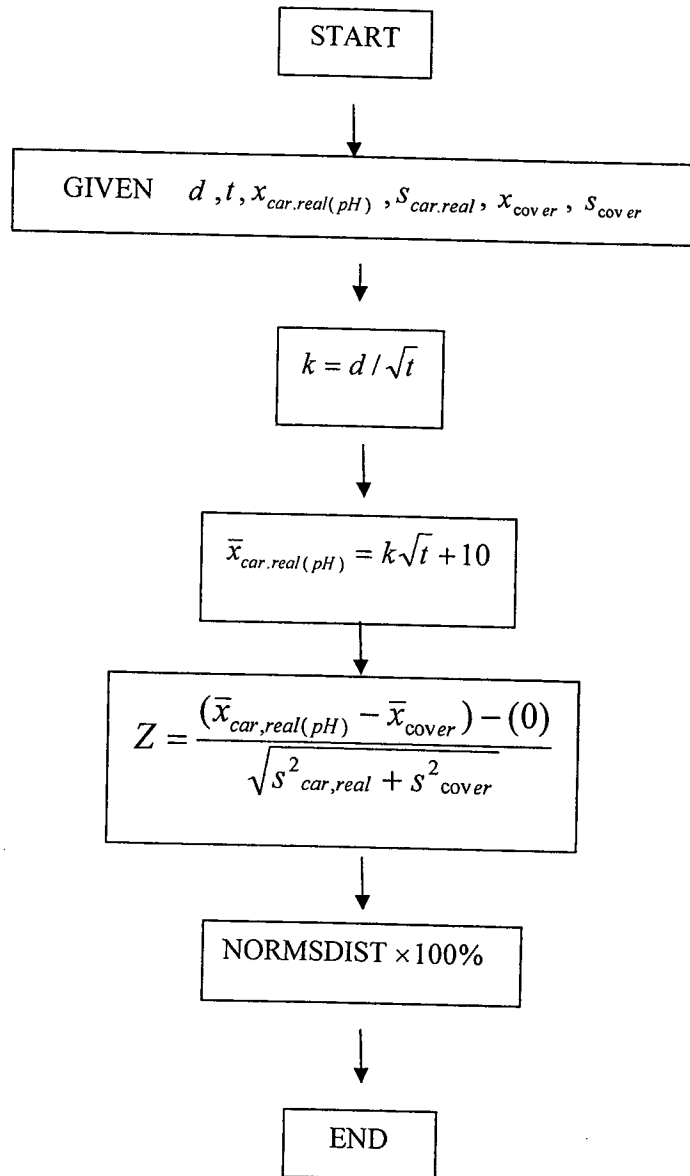
$s_{car,real}$ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะคาร์บอนเนชั่นเฉลี่ย

s_{cover} คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ย(เหล็กปลอก)

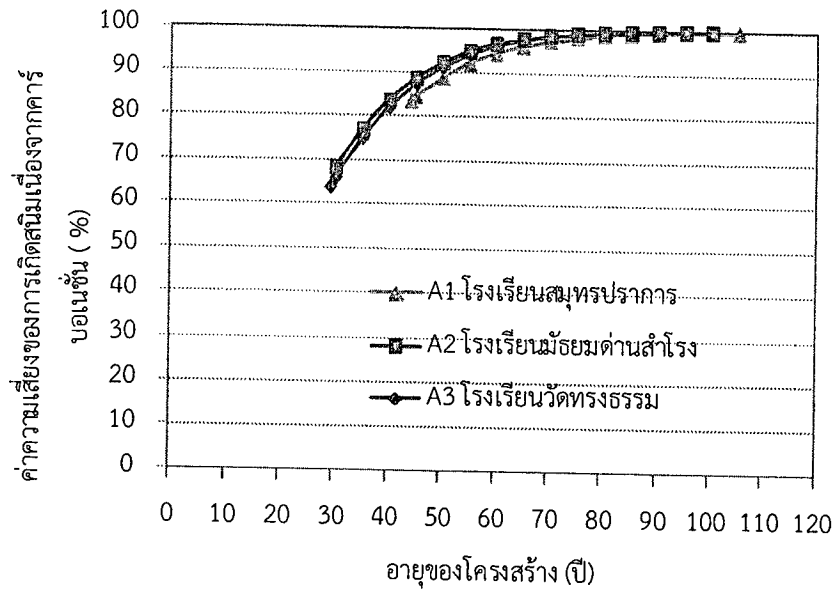
เมื่อได้ค่าตัวแปรสุ่มปกติมาตรฐานของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นแล้ว นำค่าดังกล่าวมาเปิดตารางพื้นที่ใต้โค้งปกติมาตรฐาน ซึ่งพื้นที่ใต้โค้งปกติมาตรฐานนี้คือความน่าจะเป็นที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิม

รูปที่ 4.16 ถึง 4.18 แสดงความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างอาคารเรียนที่ได้จากการวิเคราะห์ความเสี่ยงที่เหล็กเสริม จะมีโอกาสเกิดสนิมตามอายุต่างๆ ของโครงสร้าง การคำนวณหาประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น แบบการกระจายตัวคงที่ สามารถวิเคราะห์ได้ตามขั้นตอนตามรูปที่ 4.15

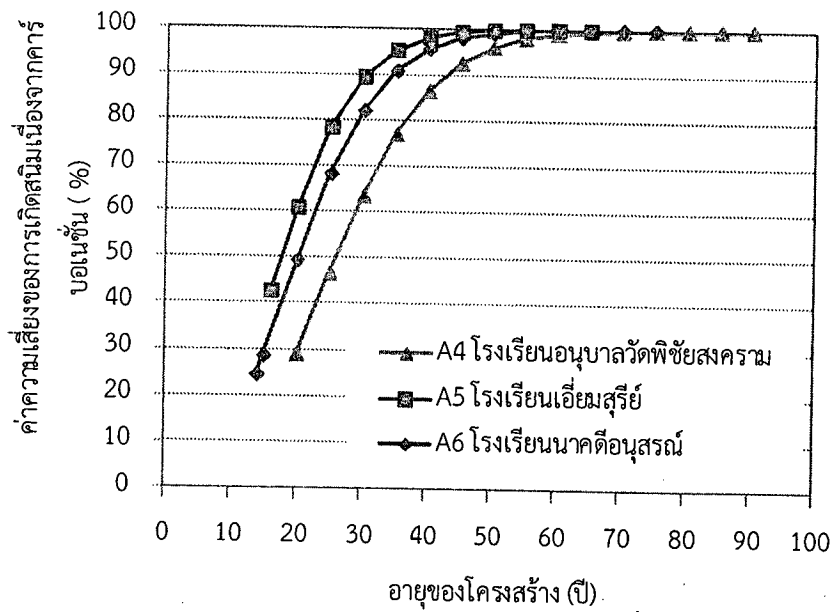
ขั้นตอนการประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น
(ค่าการกระจายตัวคงที่)



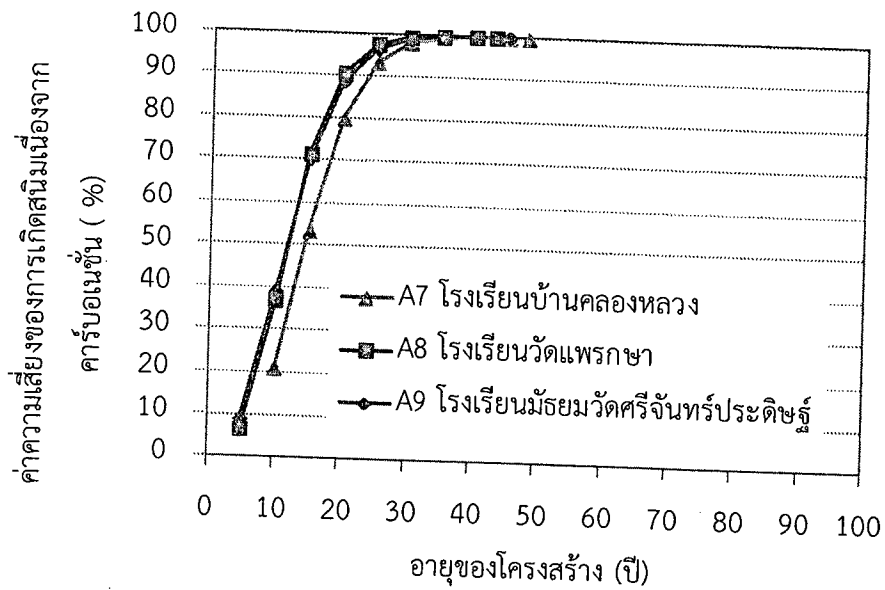
รูปที่ 4.15 ขั้นตอนการคำนวณหาประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่



รูปที่ 4.16 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างอาคารเรียนช่วงอายุ
โครงสร้างมากกว่า 24 ปี ขึ้นไป (A1, A2, A3)



รูปที่ 4.17 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างอาคารเรียน
ช่วงอายุโครงสร้าง ระหว่าง 12-24 ปี (A5, A6, A7)



รูปที่ 4.18 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชันของโครงสร้างอาคารเรียน
ช่วงอายุโครงสร้าง ระหว่าง 0-12 ปี (A7, A8, A9)

จากการพิจารณาโครงสร้างอาคารที่ตั้งอยู่ในสภาวะแวดล้อมเดียวกัน (ตารางที่ 4.17) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันของโครงสร้างที่มีอายุน้อย จะมีแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์บอเนชัน (k) สูงกว่าโครงสร้างที่มีอายุมากกว่า จะเห็นได้ชัดเจนในส่วนของโครงสร้างอาคารเรียน แต่เมื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานของโครงสร้างที่อายุ 50 ปีและ 100 ปีเท่ากัน พบว่าความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชันที่อายุน้อยจะมีเปอร์เซ็นต์ความเสี่ยงการเกิดสนิมค่อนข้างสูง เนื่องจากสาเหตุและปัจจัยดังนี้

- 1) ระยะคาร์บอนเนชันที่วัดได้จากโครงสร้างอาคารเรียนการรวมระยะปูนฉาบเข้าไปด้วย ซึ่งปูนฉาบมีอัตราการพัฒนาระยะคาร์บอนเนชันสูงกว่าคอนกรีต จึงเป็นผลทำให้อัตราการเกิดระยะ คาร์บอนเนชันมีมาก
- 2) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่ต่างกัน ย่อมส่งผลให้ระยะคาร์บอนเนชันเข้าทำลายคอนกรีตจนส่งผลกระทบต่อเหล็กเสริมภายในคอนกรีตได้เร็วขึ้น
- 3) คุณภาพของคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างของแต่ละพื้นที่ต่างกัน
- 4) อายุของโครงสร้างต่างกัน

ตารางที่ 4.17 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างอาคารเรียน ณ เวลาที่ทำการทดสอบ (พ.ศ.2556) ที่อายุการใช้งาน 50 ปี และที่อายุการใช้งาน 100 ปี

โครงสร้าง	อายุ โครงสร้าง (ปี)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ซม. ²)	ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น (%)		
			ณ เวลาที่ทดสอบ	ที่อายุการใช้งาน 50 ปี	ที่อายุการใช้งาน 100 ปี
A1	44	346.25	83.58	88.85	99.77
A2	30	324.8	68.25	92.30	99.92
A3	29	310.7	63.80	91.43	99.91
A4	20	310.0	28.90	96.16	100 ตั้งแต่ 90 ปี
A5	16	295.8	42.66	99.73	100 ตั้งแต่ 68 ปี
A6	14	299.3	24.40	99.16	100 ตั้งแต่ 80 ปี
A7	10	295.2	21.02	100 ตั้งแต่ 48 ปี	-
A8	5	283.2	6.57	100 ตั้งแต่ 43 ปี	-
A9	5	282.1	8.95	100 ตั้งแต่ 47 ปี	-

อย่างไรก็ตาม ในอนาคตร้อยละความเสี่ยงของการเกิดสนิม เนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างต่างๆ ที่ตรวจสอบทั้งหมด อาจจะไม่แน่นอนอยู่ในระดับหนึ่ง โดยเฉพาะอายุโครงสร้างที่มาก ๆ อัตราการเกิดคาร์บอนชั้นอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปจากปัจจุบันไม่มากนักน้อย เนื่องจากปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนชั้นในอนาคต อาจมีการเปลี่ยนแปลง เช่น สภาพแวดล้อม เป็นต้น

ร้อยละความเสี่ยงของการเกิดสนิม สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น การออกแบบคอนกรีต การควบคุมการเกิดคาร์บอนชั้นกับคอนกรีต และการวางแผนการดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นต้น ซึ่งในอนาคตข้างหน้าอาจจะมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อความแม่นยำของผลที่ได้

ในขณะเดียวกันความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นมีการวิเคราะห์ 2 ลักษณะ คือ

- 1) วิเคราะห์ความเสี่ยงที่ใช้ค่าการกระจายตัวคงที่ ซึ่งกล่าวมาแล้วข้างต้น
- 2) วิเคราะห์ความเสี่ยงที่ใช้ค่าการกระจายตัวแปรเปลี่ยนตามเวลา กล่าวต่อไปดังแสดงในสมการ 4.5

$$Z = \frac{(\bar{x}_{car,real(PH)} - \bar{x}_{cover}) - (0)}{\sqrt{S^2_{kt,car,real} + S^2_{cover}}} \quad (4.5)$$

เมื่อ $S_{kt,car,real} = S_k \sqrt{t}$ (4.6)

$S_{kt,car,real}$ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นที่แปรเปลี่ยนไปตามเวลา

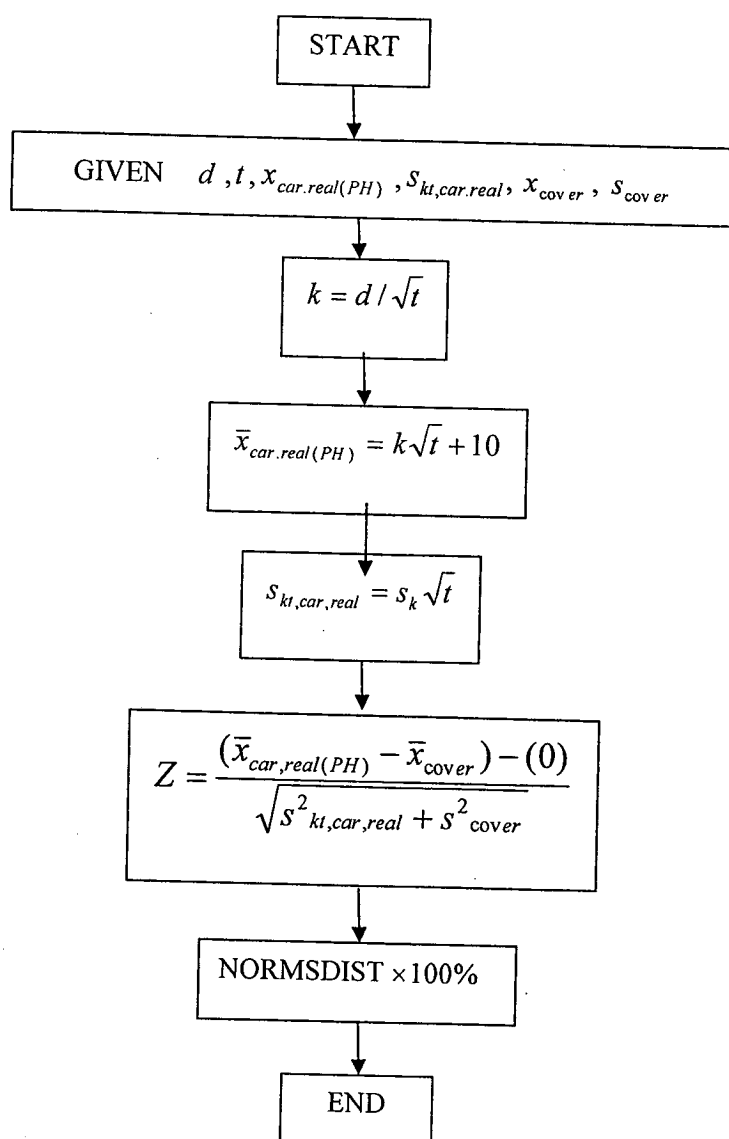
s_k คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น

t คือ อายุของโครงสร้างที่ต้องการวิเคราะห์ (เดือน)

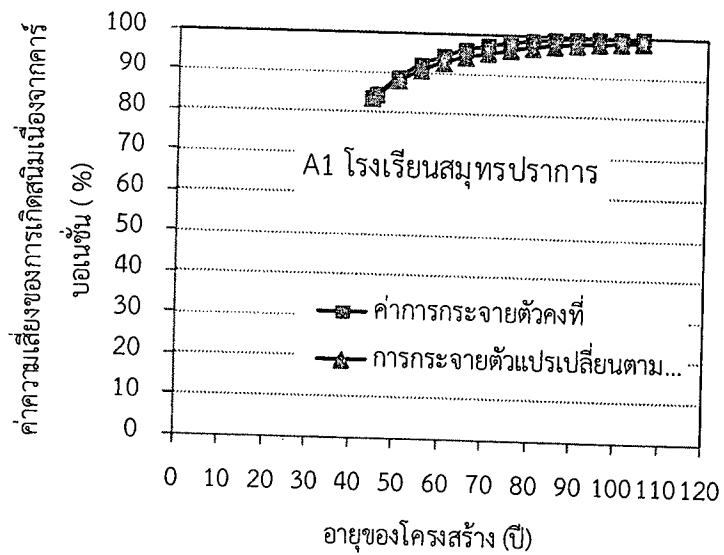
จากสมการ 4.6 พบว่า ถ้าเวลา 1 หน่วยความแปรปรวนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คือ s_k^2 แต่ถ้าเวลาเปลี่ยนไปตามกาลเวลา t หน่วย ความแปรปรวนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน คือ $s_k^2 t$

นั่นหมายความว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $s_{kt,car,real} = \sqrt{s_k^2 t}$ จะได้ $s_{kt,car,real} = s_k \sqrt{t}$ นั้นเอง

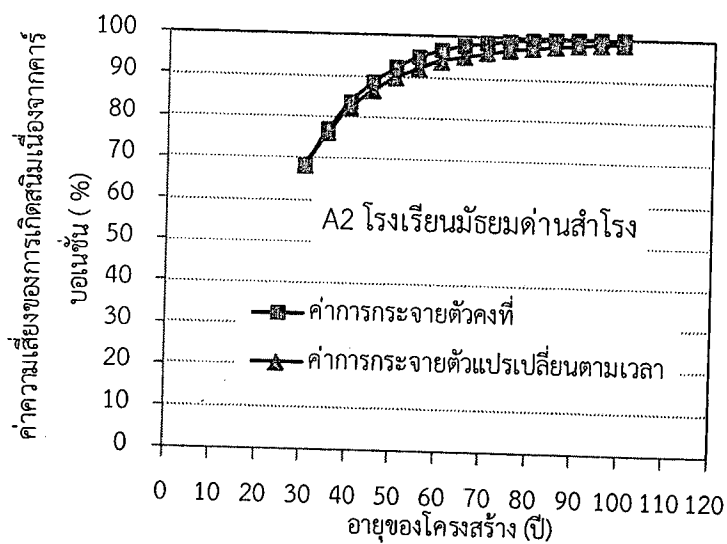
ขั้นตอนการประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น
(ค่าการกระจายตัวแบบแปรเปลี่ยนเวลา)



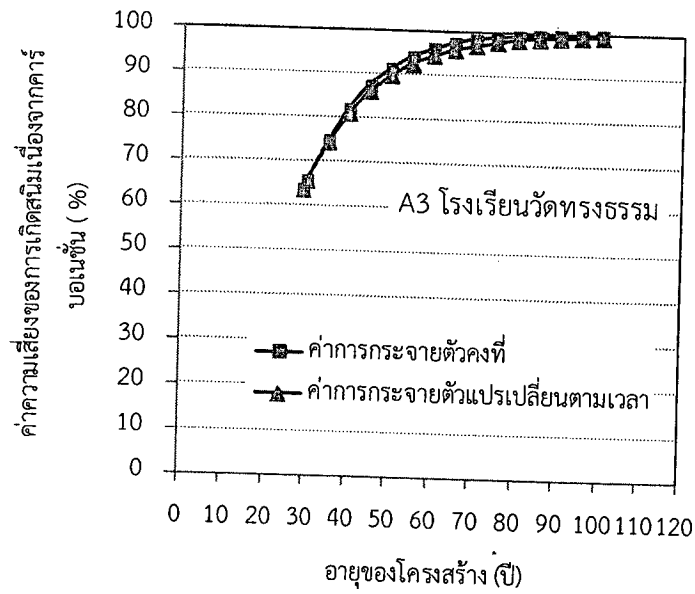
รูปที่ 4.19 ขั้นตอนการคำนวณหาประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น
แบบการกระจายแปรเปลี่ยนตามเวลา



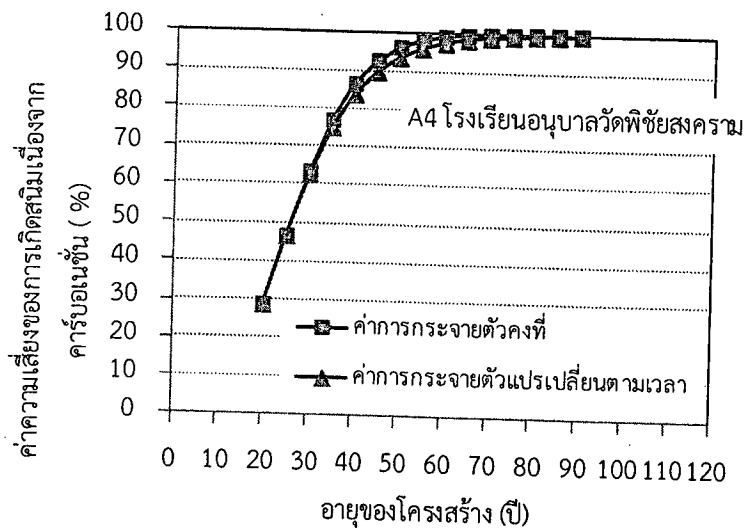
รูปที่ 4.20 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนขึ้นแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A1 โรงเรียนสมุทรปราการ



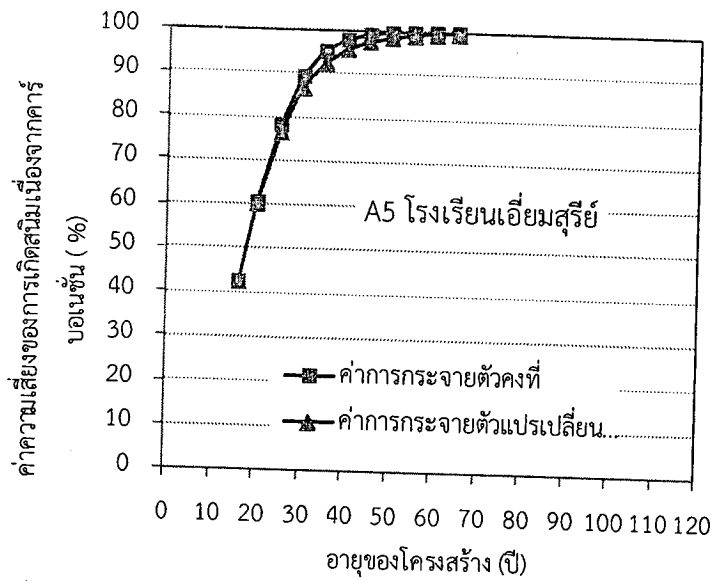
รูปที่ 4.21 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนขึ้นแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A2 โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง



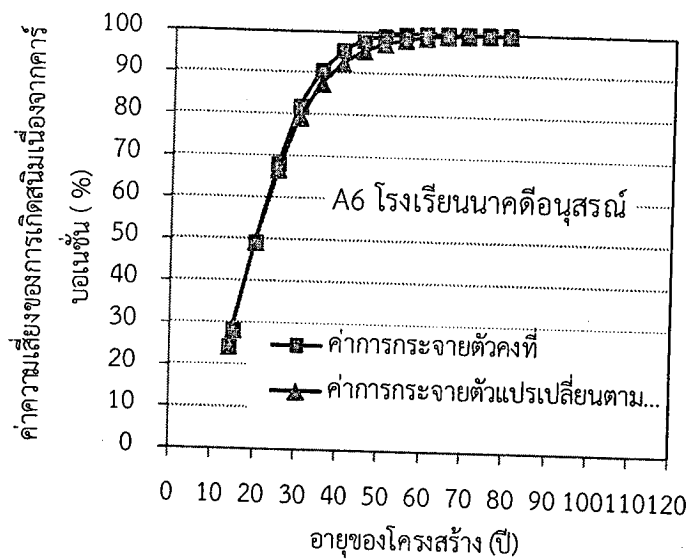
รูปที่ 4.22 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนขึ้นแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A3 โรงเรียนวัดทรงธรรม



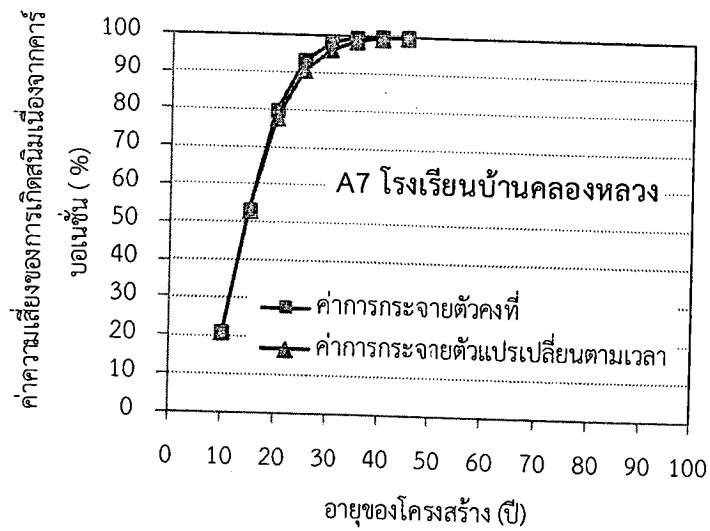
รูปที่ 4.23 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนขึ้นแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A4 โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม



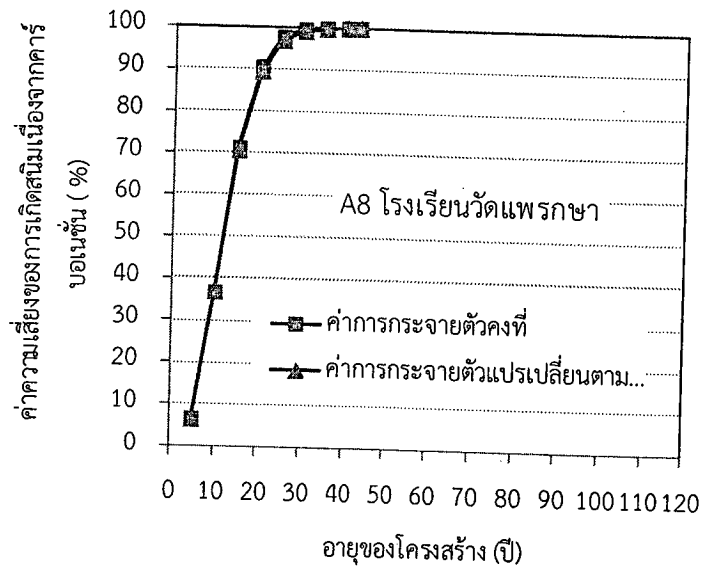
รูปที่ 4.24 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนขึ้นแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A5 โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์



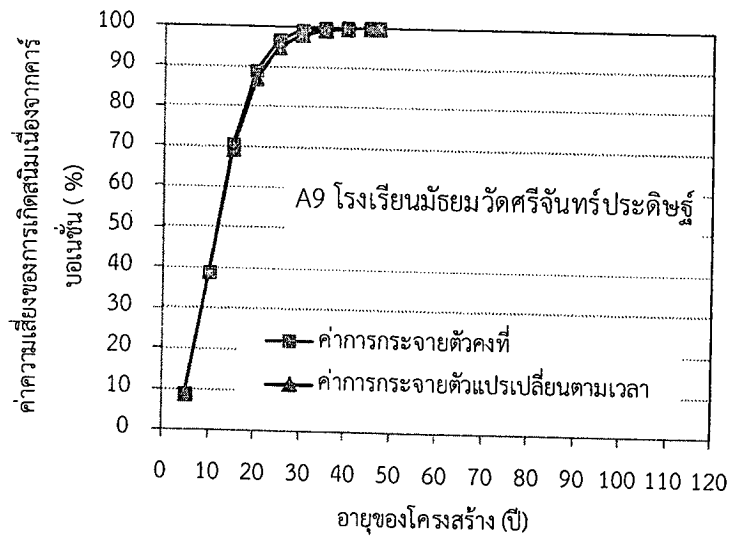
รูปที่ 4.25 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนขึ้นแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A6 โรงเรียนนาคดีอนุสรณ์



รูปที่ 4.26 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A7 โรงเรียนบ้านคลองหลวง



รูปที่ 4.27 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A8 โรงเรียนวัดแพกษา



รูปที่ 4.28 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเข้มข้นแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A9 โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์ประดิษฐ์

ค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเข้มข้นที่ใช้การกระจายตัวแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงการ ที่มีการพัฒนาระยะคาร์บอนเข้มข้นที่ช้าจะสูงกว่าค่าความเสี่ยงที่ใช้การกระจายตัวคง

งที่ในช่วงที่โครงสร้างมีอายุการใช้งานน้อยๆ แต่ในทางกลับกันเมื่ออายุการใช้งานที่มากขึ้น ค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเข้มข้นที่ใช้การกระจายตัวคงที่ จะมากกว่าการใช้การกระจายตัวที่แปรเปลี่ยนตามเวลาตลอด ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายตัวที่แปรเปลี่ยนตามเวลาจะมีผลของการเสื่อมสภาพของตัววัสดุที่เป็นไปตามช่วงเวลาเข้ามาเกี่ยวข้องตลอดการวิเคราะห์ข้อมูล แต่สำหรับการนำค่าการกระจายตัวคงที่มาวิเคราะห์จะมีการนำผลการเสื่อมสภาพของตัววัสดุ ณ ช่วงเวลานั้นรวมทั้งผลความผิดพลาดเนื่องจากการตรวจสอบระยะคาร์บอนเข้มข้น ณ เวลาดังกล่าวเข้ามาวิเคราะห์เช่นกัน

อย่างไรก็ตามเมื่อโครงสร้างมีอายุการใช้งานที่มากขึ้น ค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเข้มข้น ที่มีการใช้ค่าการกระจายตัวคงที่จะมากกว่าโครงสร้างที่มีการนำค่าการกระจายตัวที่แปรเปลี่ยนตามเวลามาวิเคราะห์ตลอด ย่อมแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่เข้าตรวจสอบทั้งหมดมีระยะปลอดภัยที่สูงกว่านั่นเอง

4.4 การเปรียบเทียบความสึกกร่อนคาร์บอนเข้มข้นจากโครงสร้างจริงและการออกแบบ

4.4.1 การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องเผชิญคาร์บอนเข้มข้น

คอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ต้องเผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แพร่เข้าไปในคอนกรีต และทำปฏิกิริยาคาร์บอนเข้มข้น ซึ่งจะทำให้ความสามารถของคอนกรีตในการปกป้องเหล็กเสริมจากการเป็นสนิมลดลง จนทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ เพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตมีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนเข้มข้น และมีอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซม (Repair-free service life) ตามที่กำหนด ต้องควบคุมให้ค่าการสึกกร่อนคาร์บอนเข้มข้นในช่วงอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซมมีค่าไม่มากกว่าระยะหุ้มเหล็กเสริม โดยสามารถใช้สมการ ที่ 4.7 ในการออกแบบ

$$X_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \cdot \sqrt{t} \quad (4.4)$$

X_c คือ ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.) วัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ

α_1 คือ สัมประสิทธิ์การสัมผัสความเปียกชื้น

1.00 สำหรับผิวคอนกรีตที่ไม่สัมผัสความเปียกชื้น

0.95 สำหรับผิวคอนกรีตที่สัมผัสความเปียกชื้น

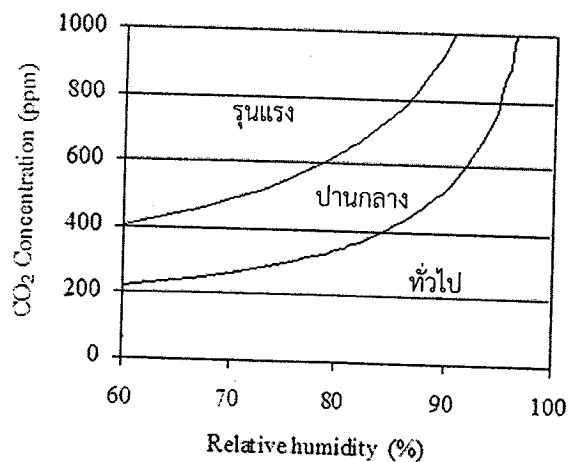
α_2 คือ สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้นดังตารางที่ 4.18

t คือ อายุของโครงสร้าง (เดือน)

ตารางที่ 4.18 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้น

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	α_2
สภาวะทั่วไป	0.65
เสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นปานกลาง	0.85
เสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นรุนแรง	1.00

ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้น สามารถกำหนดได้โดยใช้รูปที่ 4.29 โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของบริเวณสถานที่ที่จะทำการก่อสร้างในช่วงอายุการใช้งาน ซึ่งอาจต้องคาดการณ์ล่วงหน้าไปในอนาคต

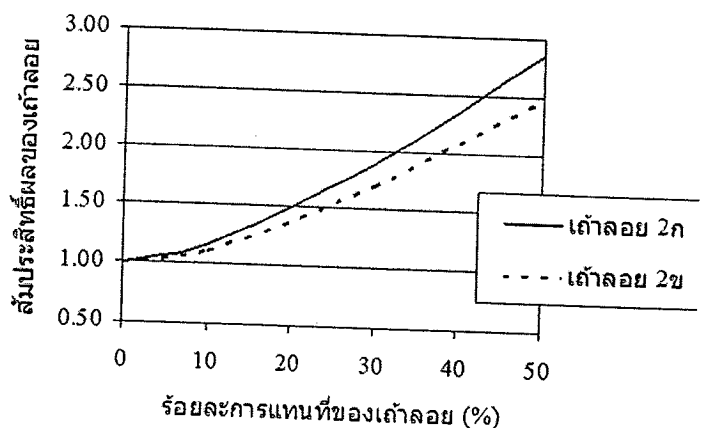


รูปที่ 4.29 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้น

เมื่อ k คือ สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้น ดังสมการ $k = 17.5 \cdot k_r \cdot (w/b)^3$

(w/b) คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

โดยค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน (k_r) (ชนิดของเถ้าลอย 2ก และ 2ข กำหนดตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 หรือ ว.ส.ท. 1014-46) ดังรูป 4.30



รูปที่ 4.30 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน

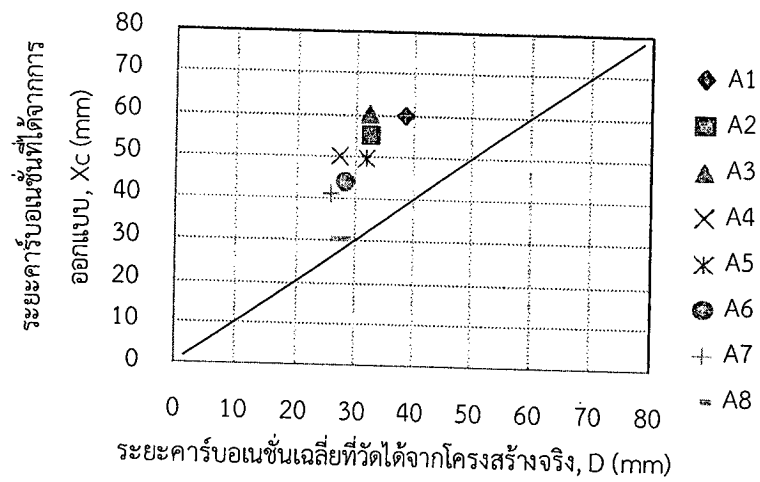
4.4.2 เปรียบเทียบความลึกคาร์บอนชั้นจากการออกแบบ (ไม่มีผลของสีและความหนาปูนฉาบ) และโครงสร้างจริง (รวมความหนาปูนฉาบและสี)

ตารางที่ 4.34 กับรูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนชั้นที่ได้จากโครงสร้างจริง (รวมความหนาปูนฉาบและสี) เทียบกับการออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบความคงทนสำหรับโครงสร้างที่เผชิญคาร์บอนชั้น (ไม่มีผลของสีและปูนฉาบ) พบว่าโครงสร้างอาคารทั้ง 9 แห่ง ที่ทำการตรวจสอบมีค่าความลึกคาร์บอนชั้นเฉลี่ย ที่วัดได้จากโครงสร้างจริงน้อยกว่าที่ได้จากการออกแบบ ซึ่งทำให้เห็นว่าโครงสร้างจริงมีตัวแปรที่มีส่วนช่วยทำให้ความลึกคาร์บอนชั้นลดน้อยลง

ตารางที่ 4.34 ความลึกคาร์บอนชั้นที่ได้จากการออกแบบ (ไม่มีผลของสีและความหนาปูนฉาบ) และโครงสร้างจริง (รวมความหนาปูนฉาบและสี) อาคารเรียน

โครงสร้างที่ตรวจสอบ	อายุ (เดือน)	α_1	α_2	$\sqrt{t}$	k (มม./เดือน ^{1/2})	X_c (มม.)	D (มม.)
A1	528	0.95	1.00	22.98	2.76	60.2	38.4
A2	360	0.95	1.00	18.97	3.07	55.4	32.5
A3	348	0.95	1.00	18.65	3.41	60.5	32.2
A4	240	0.95	1.00	15.49	3.41	50.3	30.4
A5	192	0.95	1.00	13.86	3.78	49.8	29.4
A6	168	0.95	1.00	12.96	3.59	44.3	28.8
A7	120	0.95	1.00	10.95	3.97	41.3	25.8
A8	60	0.95	1.00	7.75	4.17	30.7	29.1
A9	60	0.95	1.00	7.75	4.17	30.7	24.6

D คือ ความลึกคาร์บอนชั้นที่วัดได้จากโครงสร้างจริงรวมความหนาปูนฉาบและสี



รูปที่ 4.31 ความลึกคาร์บอนเนชั่นที่วัดได้จากโครงสร้างจริงเทียบกับความลึกคาร์บอนเนชั่นตามมาตรฐานการออกแบบความคงทนสำหรับโครงสร้างที่เผชิญคาร์บอนเนชั่น