

# การป้องกันสนิม ในโครงสร้างสัมพัสน้ำเค็มด้วยเถ้าลอย

## บทคัดย่อ

การเกิดสนิมในเหล็กเสริมเป็นปัญหาสำคัญต่อความคงทนและอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก รายงานนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยต่อพฤติกรรมการซึมผ่านของคลอไรด์ในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (ประเภทที่ 1) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้านทานซัลเฟต (ประเภทที่ 5) โดยการหล่อแท่งตัวอย่างแล้วนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1, 3, 9 และ 18 เดือน จากนั้นนำตัวอย่างมาหักและทดสอบการแทรกซึมโดยการฉีดพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท และใช้วิธีเร่งด้วยกระแสไฟฟ้าตรง 12 V อย่างต่อเนื่อง หาความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและเวลาในการทดสอบด้วยวิธี Half Cell Potential ที่ระยะหุ้มต่างๆ โดยผันแปรปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b)

ผลการศึกษาแสดงว่าเถ้าลอยมีผลดีต่อการชะลอการเกิดสนิมเหล็กในทุกอัตราส่วน (w/b) และการทดแทนด้วยเถ้าลอยช่วยลดความรุนแรงของการเกิดสนิมได้ ปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 ทั้งที่ผสมและไม่ผสมเถ้าลอยป้องกันการเกิดสนิมและการแทรกซึมของคลอไรด์ดีกว่าชนิดที่ 5 การใช้เถ้าลอยช่วยเพิ่มประสิทธิภาพดังกล่าวได้ดียิ่งขึ้น ความลึกของการซึมผ่านคลอไรด์ลดลงเหลือประมาณครึ่ง โดยอาจกล่าวได้ว่าสำหรับคอนกรีตโครงสร้างชายฝั่งทะเลซึ่งใช้ w/b 0.40 หรือต่ำกว่า อาจใช้ความหนาของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมลดลงเหลือเพียง 4 ซม. จาก 7 ซม. ของคอนกรีตปกติเป็น เมื่อใช้เถ้าลอยในปริมาณ 15-25% ในส่วนผสม

## Abstract

Corrosion in reinforcing steel is one of

the most critical aspects in determining the durability and the service life of reinforced concrete structures. This study investigated the effect of fly ash on the ingress of chloride inducing the corrosion of steel. Two types of cement were used, namely Type 1 Ordinary Portland Cement and Type 5 Sulfate Resistant Cement. Specimens were cast and submerged in NaCl solution for 1, 3, 9 and 18 months. Ingress of chloride was determined by spraying fractured surface with 0.1 N silver nitrate and measuring the colour change boundary. The study also looked into the effects of water/binder ratio (w/b) and the percentages of fly ash on the corrosion of steel under 12 V DC acceleration.

The results revealed the beneficial effect of fly ash in decreasing the rate and the extent of the corrosion of steel at every water/binder ratio. Type I Portland cement, with or without fly ash, afforded better degree of protection of steel from corrosion than did Type V cement. Addition of fly ash significantly enhanced the benefit, with depth of chloride ingress reduced by half. The use of 15-25% fly ash on a 0.40-water/binder ratio concrete mixture could reduce the concrete cover from 7 cm to 4 cm to achieve the same protective efficiency against to chloride penetration.

คำหลัก : Corrosion, Chloride, Fly ash, Accelavation

## 1. บทนำ

การซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนจากภายนอกเป็นปัญหาใหญ่ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเล มีผลกระทบโดยตรงต่อการเกิดสนิม เนื่องจากผิวคอนกรีตต้องสัมผัสกับน้ำทะเล หรืออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีไอเกลือและความชื้นตลอดเวลา การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นปัจจัยสำคัญอันดับแรกๆ ที่ทำให้ความคงทน และอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตลดลง

การเติมวัสดุอื่นลงในส่วนผสมคอนกรีตมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีต และพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีต ในปัจจุบันมีการใช้เถ้าลอยจากแหล่งในประเทศ ผสมในคอนกรีตเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างมากขึ้นและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะมีผลต่อพฤติกรรมตลอดจนความคงทนของโครงสร้าง แม้เป็นที่ยอมรับกันว่าการใช้เถ้าลอยในคอนกรีตให้ผลดีต่อการเพิ่มความทึบแน่นในเนื้อของคอนกรีต จากเหตุผลสองประการคือ Filling Effect และการเพิ่มผลผลิตพันธะสารเชื่อมประสานที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งความทึบแน่นที่เพิ่มขึ้นนี้จะส่งผลดีต่อความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตต่างๆ

การเกิดสนิมเหล็กเป็นกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อมีองค์ประกอบคือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าภายใน ความชื้น และออกซิเจน โดยธรรมชาติแล้วสภาวะความเป็นต่างของคอนกรีตที่มีค่า pH ประมาณ 12-13 จะช่วยต้านทานการเกิดสนิมเหล็กได้ในระดับหนึ่ง จากฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) ที่เคลือบผิวของเหล็ก ทำหน้าที่ปกป้องผิวเหล็กเสริมมิให้เป็นสนิม หากฟิล์มออกไซด์ของเหล็กเสริมนี้ถูกทำลายลง เหล็กเสริมจะเกิดสนิมได้หรือที่เรียกว่า Depassivation ซึ่งสามารถเกิดได้เมื่อสภาวะความเป็นต่างของคอนกรีตลดต่ำลงจนมีค่า pH ประมาณ 11.5-12.0 เนื่องจากการเกิดคาร์บอนขึ้นจากการซึมผ่านของน้ำ และจากการทดแทนด้วยเถ้าลอย หรือจากการมีคลอไรด์ไอออนแทรกซึมผ่านเนื้อคอนกรีตเข้ามาจนถึงผิวเหล็กเสริมโดยมีความเข้มข้นถึงระดับหนึ่ง จะเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เหล็กเสริมมีแนวโน้มเกิดสนิมได้

เมื่อการซึมผ่านหรือแพร่ผ่านคลอไรด์ไอออนเข้ามาในเนื้อคอนกรีต ขึ้นกับคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านความพรุน และปัจจัยที่สำคัญอีกหลายประการ ได้แก่ ชนิดของปูนซีเมนต์ สภาพการบ่ม อุณหภูมิ ชนิดของแคตไอออน ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ สภาวะแวดล้อม เป็นต้น ปริมาณคลอไรด์

ทั้งหมดในเนื้อคอนกรีต (Total Chloride) เป็นผลรวมของคลอไรด์ในสองประเภทคือ Bound Chloride คือคลอไรด์บางส่วนที่ถูกจับยึดอยู่ในผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันและที่เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นรูปของ Calcium Chloro-Aluminate Hydrate (Friedel's Salt) หรือถูกดูดซับด้วยผิวของ Gel Pores และบางส่วนอาจถูกดูดซับที่ผิวของผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย ซึ่งไม่มีผลต่อการเกิดสนิม ส่วน Free Chloride คือ คลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำในโพรงของคอนกรีต ซึ่งหากมีปริมาณมากเพียงพอก็จะส่งผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิมได้ โครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง เช่น บริเวณ Splash Zone จะได้รับผลกระทบทั้งจากการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนค่อนข้างรุนแรงกว่าคอนกรีตในสภาวะปกติ

## 2. ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาการแทรกซึมได้ของเกลือคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย และศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยใช้วิธีเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยการใช้กระแสไฟฟ้าตรง ซึ่งใช้ความต่างศักย์ 12V (DC) โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับสัดส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย 5 ระดับคือ 0%, 15%, 25%, 35% และ 50% โดยผันแปรอัตราส่วน Water/Binder (w/b) 0.40, 0.50, 0.65 และเปรียบเทียบผลกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 โดยคงอัตราส่วน (w/b) ที่ 0.50 และใช้สัดส่วนการแทนที่เถ้าลอยสองระดับคือ 25% และ 50% เพื่อดูแนวโน้มผลกระทบของเถ้าลอยต่อคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ต่างๆ

## 3. การศึกษาในอดีต

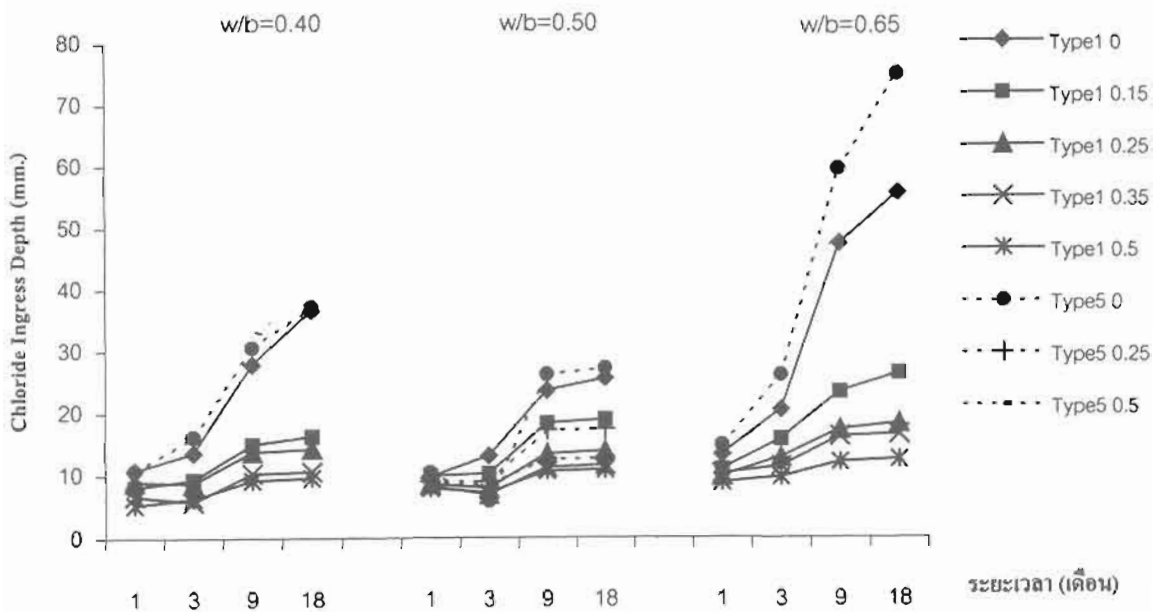
การเกิดสนิมมักเริ่มขึ้นเมื่อฟิล์มเหล็กออกไซด์ที่เคลือบผิวเหล็กเสียหายและมีปัจจัยครบ ซึ่งได้แก่ ความชื้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า และออกซิเจน การเกิดสนิมอาจแบ่งเป็นสองขั้นตอน [1] คือ Initiation Period และ Propagation Period โดยในช่วง Initial Period เริ่มเมื่อคลอไรด์ไอออนซึมหรือแพร่ผ่านเข้ามาสะสมในเนื้อคอนกรีตจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤต Threshold ที่ปริมาณคลอไรด์ในช่วงตั้งแต่ 0.2-1.33 กก./ม.<sup>3</sup> หรือตั้งแต่ 75-1175 ppm ของคอนกรีต ซึ่งเป็นระดับที่ฟิล์มออกไซด์ที่เคลือบเหล็กเสียหาย ตามด้วยช่วง Propagation Period ซึ่งเกิดกระบวนการไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมเหล็กอย่างต่อเนื่อง [2] อย่างไรก็ตาม สำหรับคอนกรีต

ผสมแก้ล้อย ค่าระดับดั่งกล่าวแตกต่างไปจากคอนกรีตปกติ เนื่องจากมีปัจจัยที่มีผลกระทบแตกต่างออกไป การเติมแก้ล้อย มีผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น ช่องว่าง Capillary มีขนาดเล็กลง ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการซึมหรือแพร่ผ่านของ คลอไรด์ไอออน โดยที่สัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย ของคลอไรด์ไอออนต่ำกว่าคอนกรีตปกติประมาณสามเท่า คือ  $14.7 \times 10^{-6}$  ซม./วินาที เมื่อเทียบกับ  $44.7 \times 10^{-6}$  ซม./วินาที [3] คุณสมบัติในด้านความซึมได้ยังขึ้นกับการป่มขึ้น และ

อุณหภูมิที่ใช้ป่มคอนกรีต คอนกรีตผสมแก้ล้อยที่ป่ม ในอุณหภูมิต่ำ ยังคงให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมของ คลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตปกติ ซึ่งแสดงว่าการเกิดปฏิกิริยา ปอซโซลานยังคงดำเนินต่อไปช้าๆ และมีความสำคัญต่อ การพัฒนาโครงสร้างภายใน ซึ่งเสมือนการเพิ่มพื้นที่ในการจับ Free Chloride ไว้ด้วยผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลาน [4] ซึ่งทำให้ลดอัตราการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออน รวมถึงมีปริมาณ Water-Soluble Chloride น้อยลงด้วย [5]

ตารางที่ 1 Chloride Ingress Depth by AgNO<sub>3</sub> Test ที่อายุต่างๆ เมื่อ w/b = 0.40, 0.50 และ 0.65

Cement Type	%FA	Chloride Ingress Depth (mm.)											
		w/b = 0.40				w/b = 0.50				w/b = 0.65			
		ที่อายุ, เดือน				ที่อายุ, เดือน				ที่อายุ, เดือน			
		1	3	9	18	1	3	9	18	1	3	9	18
Type 1	0%	10.8	13.6	27.9	36.7	9.8	13.2	23.7	25.7	13.4	20.5	47.4	55.7
	15%	8.1	9.3	15.0	16.3	10.0	10.3	18.4	19.0	11.0	15.8	23.4	26.4
	25%	9.0	8.7	13.8	14.3	8.7	8.0	13.5	14.0	9.9	12.9	17.3	18.3
	35%	6.7	5.8	10.3	10.6	8.3	7.0	11.3	11.7	10.3	11.4	16.2	16.5
	50%	5.3	6.3	9.2	9.6	8.0	7.3	10.7	10.9	8.9	9.7	12.1	12.5
Type 5	0%	10.70	16.20	30.60	37.30	10.50	6.00	26.30	27.30	14.90	26.10	59.60	75
	25%					9.10	9.10	17.30	17.50				
	50%					8.60	8.60	12.60	12.80				



รูปที่ 1 Chloride Ingress Depth by AgNO<sub>3</sub> Test ที่อายุต่างๆ เมื่อ w/b = 0.40, 0.50 และ 0.65

การใช้เถ้าลอยในส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ต่ำประมาณ 0.35 ช่วยลดสัมประสิทธิ์ของการแพร่ผ่านของคลอไรด์ไม่มากนัก เนื่องจากเนื้อคอนกรีตมีความพรุนต่ำ มีขนาดช่องว่างเล็กและคดเคี้ยวอยู่แล้ว การใช้เถ้าลอยจึงอาจไม่มีผลต่อการปรับปรุงส่วนนี้มากนัก [6]

ผลการศึกษาคอนกรีตผสมเถ้าลอยจากแม่เมาะในด้านการซึมได้ของคลอไรด์โดยการหักแห้งตัวอย่างและฉีดพ่นด้วยสารละลาย Silver Nitrate และการเจาะเก็บผงคอนกรีตที่มีความลึกต่างๆ มาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ พบว่าเถ้าลอยลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดี และการเพิ่มปริมาณของเถ้าลอยช่วยลดการซึมผ่านได้ โดยผลกระทบจากปริมาณการแทนด้วยเถ้าลอยระหว่างร้อยละ 15-35 โดยน้ำหนัก มีความสำคัญต่อการลดการซึมผ่านได้มากกว่า ผลจากการลดอัตราส่วน w/c [7]

เป็นที่ยอมรับกันว่าคอนกรีตหุ้มที่ดี ต้องมีความทึบแน่น และมีระยะหุ้มที่เหมาะสม จึงสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ดี แต่สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยซึ่งการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกค่อนข้างช้า มีความไวต่ออิทธิพลการบวมมากกว่าคอนกรีตปกติ [8]

#### 4. วิธีการทดสอบ

ในการศึกษานี้ทำการหล่อแห้งตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. ทหนา 5 ซม. และถอดแบบเมื่อครบ 24 ชม. บ่มในน้ำจนอายุครบ 28 วัน นำมาเคลือบผิวด้านบนและด้านล่างของทรงกระบอกทั้งสองด้านด้วย Epoxy แล้วแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% เป็นระยะเวลา 1, 3, 9, 18 เดือน แล้วนำมาทดสอบการแทรกซึมได้ของเกลือคลอไรด์โดยนำแห้งตัวอย่างมากัดให้หักกลาง แล้วใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรทความเข้มข้น 0.1N พ่นที่ผิวตัวอย่าง วัดระยะการซึมของคลอไรด์ออกจากที่สารละลายเปลี่ยนเป็นสีเทา สำหรับการเร่งการเกิดสนิมของเหล็ก ทดสอบโดยหล่อคอนกรีตทรงกระบอกศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. ซึ่งมีเหล็กเสริมฝังอยู่ในแนวแกนห่างจากผิวคอนกรีต 2, 4 และ 7 ซม. เคลือบผิวบนของแห้งคอนกรีตและส่วนของเหล็กที่พ้นจากคอนกรีตด้วย Epoxy แล้วแช่แห้งตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% โดยเร่งการเกิดสนิมด้วยไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์ 12 โวลต์ วัดการเกิดสนิมด้วย Half Cell Potentiometer ทุก 7 วัน

#### 5. ผลการทดสอบ

การศึกษานี้พบว่าเถ้าลอยมีผลต่อความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ ดังนี้

1. ระดับความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์เมื่อแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ระยะเวลา 1, 3, 9 และ 18 เดือน และวัดการแทรกซึมด้วยการฉีดพ่นซิลเวอร์ไนเตรทแสดงในรูปที่ 1 และตารางที่ 1 เถ้าลอยสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ในทุกค่าของ w/b ความลึกของการแทรกซึมมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น และมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ผ่านไป โดยเฉพาะในปริมาณการแทนที่สูงๆ ที่ w/b ต่างๆ การแทรกซึมได้ของคลอไรด์จะมากขึ้นตาม w/b ที่มากขึ้น เป็นที่น่าสังเกตว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีการแทรกซึมได้เร็วกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เล็กน้อย ทั้งเมื่อผสมและไม่ผสมเถ้าลอย

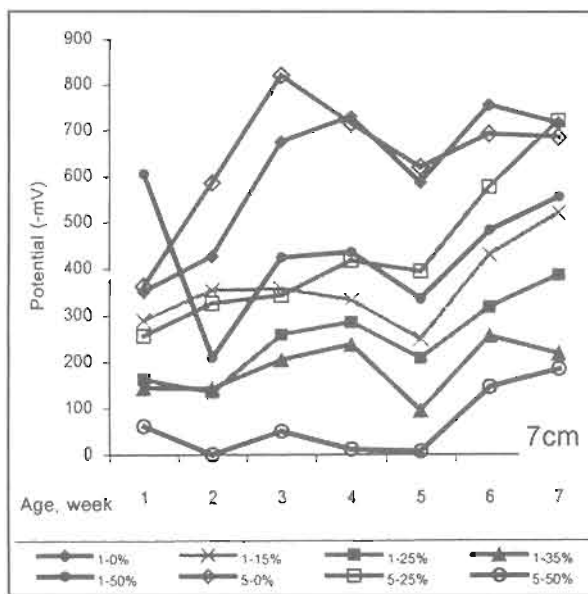
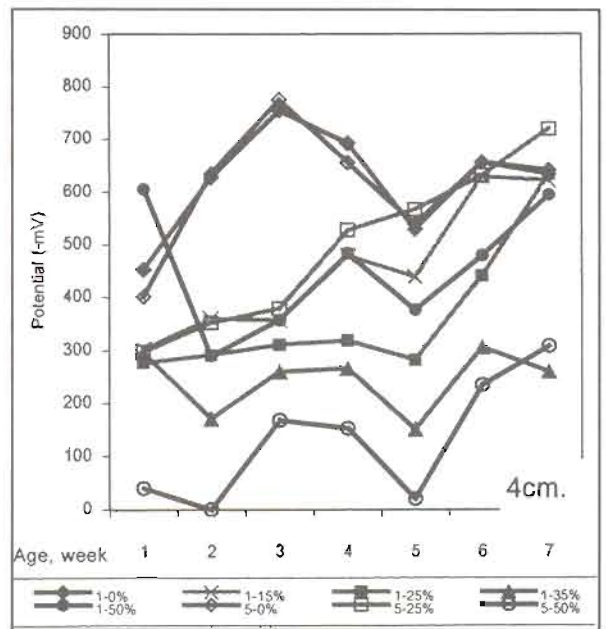
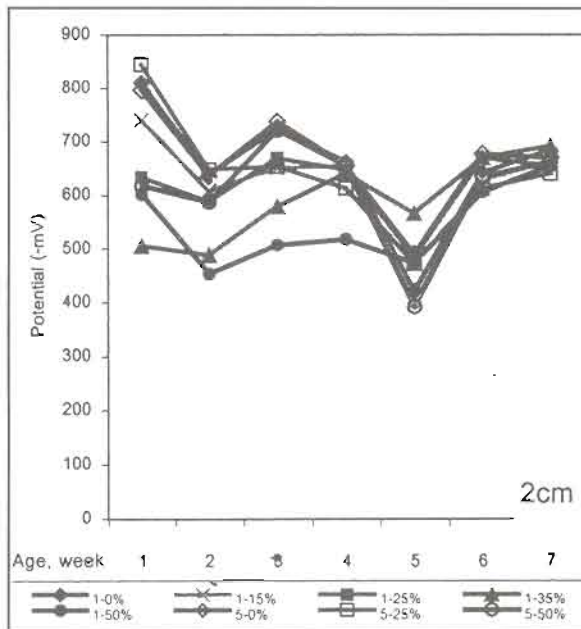
2. ผลของเถ้าลอยที่มีต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม (Corrosion of Steel Reinforcement) ผลการวัดค่าความต่างศักย์ด้วยวิธี Half Cell Potential เพื่อศึกษาแนวโน้มการเกิดสนิมในเหล็กเสริม แสดงผลในตารางที่ 2 และรูปที่ 2 (สำหรับค่า w/b 0.5) ข้อมูลจากการทดสอบซึ่งมีการกระจายตัวค่อนข้างกว้าง ทำให้ไม่สามารถระบุแนวโน้มได้ด้วยระดับความมั่นใจที่สูงนัก แต่ในภาพรวมพอจะกล่าวได้ว่าเถ้าลอยสามารถลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ในทุกค่าของ % Fly Ash Replacement แต่ไม่สามารถบอกได้ชัดเจนว่าความแตกต่างของ % Fly Ash Replacement มีผลกระทบอย่างไร

แต่เมื่อพิจารณาแต่ละตัวแปรพบว่าระยะหุ้มของเหล็กเสริมมีอิทธิพลต่อแนวโน้มการเกิดสนิมค่อนข้างชัดเจน โดยเฉพาะที่อายุต้นๆ และที่ค่า w/b สูงๆ ปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยแสดงอิทธิพลต่อค่าต่างศักย์ที่วัดได้ เมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นความต่างศักย์มีขนาดลดลง ที่ค่า w/b ต่ำแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไม่อาจระบุได้ชัดเจน โดยเฉพาะที่ค่าระยะหุ้มเพิ่มขึ้น

3. การศึกษาการฟุกร่อนของเหล็กเสริม ทำโดยนำตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการแช่ในสารละลาย NaCl และเร่งด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า 12V นำมาสกัด แล้วตรวจสอบสภาพเหล็กเสริมภายใน โดยการฟุกร่อนของเหล็กเสริมมีตั้งแต่เกือบไม่มีการฟุกร่อนเลยจนไม่มีเนื้อเหล็กเหลืออยู่ ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้แบ่งระดับการฟุกร่อนออกเป็น 5 ระดับ มีระดับที่ 1 ที่ไม่มีการฟุกร่อนเลย จนถึงระดับที่ 5 มีฟุกร่อนจนไม่มีเหล็ก

ตารางที่ 2 Potential & Time Relationship (w/b = 0.50) ที่ระยะหุ้มต่างๆ

Cement Type	%FA	Potential (-mV) from 1st-7th week																				
		2cm.covering							4cm.covering							7cm.covering						
		1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
Type 1	0	810	638	723	662	422	642	684	453	627	755	692	529	655	640	351	427	675	729	586	755	715
	0.15	740	608	651	655	402	627	662	303	360	357	479	439	628	621	290	353	357	333	250	430	520
	0.25	634	588	669	647	484	669	655	277	291	311	319	282	441	633	163	135	259	286	208	318	386
	0.35	506	489	579	641	566	669	692	296	171	259	266	151	306	260	144	143	205	238	96	256	218
	0.50	602	454	507	518	474	606	655	605	290	357	483	376	479	594	605	209	424	435	335	482	554
Type 5	0	796	636	738	655	491	677	669	401	634	775	655	537	655	633	362	586	820	715	620	692	684
	0.25	844	648	653	613	473	613	640	297	352	379	527	566	630	719	257	326	343	417	394	576	720
	0.50	618	587	721	655	392	634	662	40	0	168	153	20	234	308	61	0	50	11	6	146	184



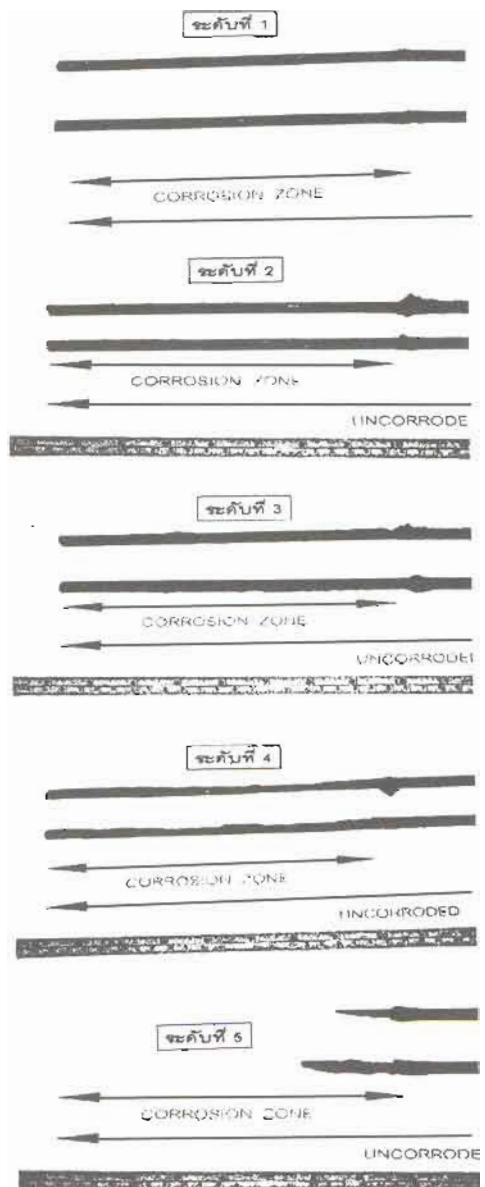
รูปที่ 2 Potential & Time Relationship (w/b = 0.50) ที่ระยะ Covering ต่างๆ

ตารางที่ 3 การจำแนกระดับความรุนแรงของสนิมในเหล็กเสริม (ดังรายละเอียดประกอบรูปที่ 3)

ระดับ	ความรุนแรง	ลักษณะที่ปรากฏ
1	รุนแรงน้อยมาก หรือไม่ปรากฏ	ผิวเหล็กยังอยู่ในสภาพดี หรืออาจปรากฏร่องรอยสนิมบ้างเพียงเล็กน้อย หน้าตัดเหล็กเสริมลดลงประมาณ 0-5%
2	รุนแรงน้อย	ปรากฏร่องรอยของสนิมชุป การกัดกร่อนอาจทำให้พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมลดลงประมาณ 5-20%
3	รุนแรงปานกลาง	สนิมกัดกร่อนจนพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมอาจหายไปประมาณ 20-40% หรือน้อยกว่านั้น
4	รุนแรงมาก	สนิมกัดกร่อนอย่างรุนแรงจนพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมหายไป 40-80% ของพื้นที่หน้าตัดเดิม
5	รุนแรงมากที่สุด	สนิมกัดกร่อนจนตัดเหล็กเสริมหายไปมากกว่า 80% ถึงเนื้อเหล็กหาย

ตารางที่ 4 ระดับการผุกร่อนของเหล็กเสริมในสภาวะต่างๆ

Mix No.	Type of Cement	w/b	%Fly Ash Replacement	Level Covering (cm)		
				2	4	7
1	1	0.4	0	3	3	2
2	1	0.4	15	2	2	1
3	1	0.4	25	3	2	1
4	1	0.4	35	2	2	1
5	1	0.4	50	2	1	1
6	1	0.5	0	5	3	3
7	1	0.5	15	5	3	2
8	1	0.5	25	5	3	2
9	1	0.5	35	5	1	1
10	1	0.5	50	4	2	1
11	1	0.65	0	5	3	2
12	1	0.65	15	5	4	3
13	1	0.65	25	4	3	2
14	1	0.65	35	4	3	2
15	1	0.65	50	4	1	2
16	5	0.4	0	4	4	3
17	5	0.5	0	4	4	4
18	5	0.5	25	5	4	3
19	5	0.5	50	5	1	1
20	5	0.65	0	4	4	5



รูปที่ 3 ภาพระดับความรุนแรงของการเกิดสนิม  
Uncorroded คือความยาวเดิมเมื่อยังไม่มีการเกิดสนิม

เหลือ ดังแสดงในตารางที่ 3 ผลการศึกษาของแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 3 พบว่า w/b มีผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมาก และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจะเพิ่มตามการเพิ่มของ w/b และความหนาของคอนกรีตหุ้ม กรณีของ w/b เท่ากับ 0.40 ที่ระดับลึก 7 ซม. ซึ่งมีการป้องกันดีมาก เหล็กยังอยู่ในสภาพดีมากแทบไม่มีการสึกกร่อนเกิดขึ้นเลย เนื้อคอนกรีตภายหลังจากทุบแตกและนำมาพ่นด้วยซิลเวอร์ในเตาเพื่อตรวจสอบการแทรกซึมของคลอไรด์พบว่า ในกรณีที่เกิดสนิมเหล็กอย่างรุนแรงนั้น การเปลี่ยนสีของคอนกรีตหุ้มสามารถชี้ถึงระดับคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตจนถึงเหล็กเสริมได้ชัดเจน จากการจัดกลุ่มและเปรียบเทียบสภาพพบว่าสัดส่วนแก้าลอยไม่มีผลชัดเจนต่อการผุกร่อนของเหล็กเสริม มีแนวโน้มพอประเมินได้ว่าแก้าลอยมีส่วนช่วยลดการผุกร่อนได้ แต่แนวโน้มดังกล่าวไม่ชัดเจนเพียงพอ จากการเปรียบเทียบผลจากประเภทของปูนซีเมนต์ เห็นได้ชัดว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ป้องกันเหล็กเสริมได้น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แนวโน้มนี้สอดคล้องกับผลการวัดการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ที่สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

## 6. บทสรุปงานวิจัย

จากการศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมของคอนกรีตทั้งที่ผสมและไม่ผสมแก้าลอย โดยผันแปรชนิดของซีเมนต์อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณการแทนที่แก้าลอยภายใต้ภาวะการเร่งสภาพแวดล้อม อาจสรุปผลได้ ดังนี้

1. แก้าลอยสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต และค่า w/b ของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการแทรกซึมของคลอไรด์
2. แก้าลอยสามารถลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ในทุกปริมาณการแทนที่ของแก้าลอย ระยะหุ้มของเหล็กเสริมมีอิทธิพลต่อแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมสูง และปริมาณแก้าลอยที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการลดค่าความต่างศักย์ค่อนข้างชัดเจน โดยเฉพาะในช่วงอายุต้นๆ และที่ระยะหุ้มน้อยๆ
3. สำหรับพฤติกรรมจริงของการเกิดสนิมเหล็ก ค่า w/b และระยะหุ้มเป็นสองปัจจัยที่สำคัญยิ่งต่อการต้านทานการผุกร่อนของเหล็ก แก้าลอยมีผลกระทบเช่นกันแต่แนวโน้มของอิทธิพลจากสัดส่วนแก้าลอยยังไม่ปรากฏชัดเจนในช่วงเวลาของการศึกษานี้

4. จากผลการศึกษานี้อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่าสำหรับคอนกรีตโครงสร้างชายฝั่งทะเลซึ่งใช้ w/b ประมาณ 0.40 อาจใช้ความหนาของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมลดลงจาก 7 ซม. ของคอนกรีตปกติเป็น 4 ซม. เมื่อใช้แก้าลอยในปริมาณ 15-25% ในส่วนผสม

## 7. เอกสารอ้างอิง

1. Brown R.D., Design Prediction of the life of reinforced concrete in marine and chloride environment cited by C.Jaegermann 1990, Effect of water cement ratio and curing on chloride penetration into concrete exposed to Mediteranean sea climate., ACI Mat.J87(4) : 333-339, 1982.
2. Funahashi M., Predicting corrosion -free service life of a concrete structure in a chloride environment, ACI Mat.J87 (6) : 584-587, 1990.
3. Brown R.D., Mechanism of corrosion of steel in concrete in relation to design, inspection and repair of offshore and coastal structures, In Performance of concrete in marine environment ed.by V.M.Malhotra, ACI SP-65 pp 169-204, 1980.
4. Dhir R.K., M.R Jones and A.E.Elghaly, PFA Concrete : Exposure temperature effect on chloride diffusion, Cement and Concrete Research 23 : 1105-1114, 1993.
5. Arya C.,N.R.Buenfeld and J.B.Newman, Factors influencing Chloride Binding in Concrete, Cement and Concrete Research 20:291-300, 1990.
6. Ampadu K.O., K. Torii and M.Kawamura, Beneficial effect of flyash on chloride diffusivity of hardened cement paste, Cement and Concrete Research 29(40) : 585-590, 1999.
7. R. Wongjeeraphat, Effect of Flyash on chloride ingress, Master Thesis, Kasetsart University Thailand, 2002.
8. A.M.Neville, Properties of concrete, 4th ed. John Wiley & Sons Inc., New York, 1997.

