

## ความคงทนของคอนกรีตจากการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์

### บทนำ

การเกิดสนิมในเหล็กเสริม(ดูรูปที่ 1. ประกอบ) เป็นปัญหาสำคัญต่อความคงทนและอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลรวมไปถึงโครงสร้างที่อยู่ในพื้นที่น้ำกร่อยด้วย เนื่องจากผิวคอนกรีตต้องสัมผัสกับน้ำทะเลหรืออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีไอเกลือและความชื้นตลอดเวลา การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตจึงเป็นปัจจัยสำคัญอันดับแรก ๆ ที่ทำให้ความคงทนและอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตลดลง ซึ่งต้องสิ้นเปลืองงบประมาณค่อนข้างมากในการซ่อมบำรุงและแก้ไขปัญหา ฉะนั้นรายงานนี้จึงเป็นการค้นคว้ารายงานการวิจัย ว่าด้วยเรื่องการซึมผ่านของคลอไรด์ในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต



รูปที่ 1 แสดงการเป็นสนิมของเหล็กเสริมและการหลุดร่อนของคอนกรีต

(ที่มา : <http://www.parchem.com.au/norcure.htm> , 2547)

### ความหมาย

ความคงทนของคอนกรีตหมายถึง ความสามารถในการทนทานต่อสภาพการทำลายทั้งหลาย ไม่ว่าจะ เป็นทั้งทางเคมี และทางกล(ปริญญา, 2547)

การเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์หมายถึง การเสื่อมสภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริม อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฟฟ้า-เคมี โดยมีไอออนของคลอไรด์เป็นตัว Catalysts

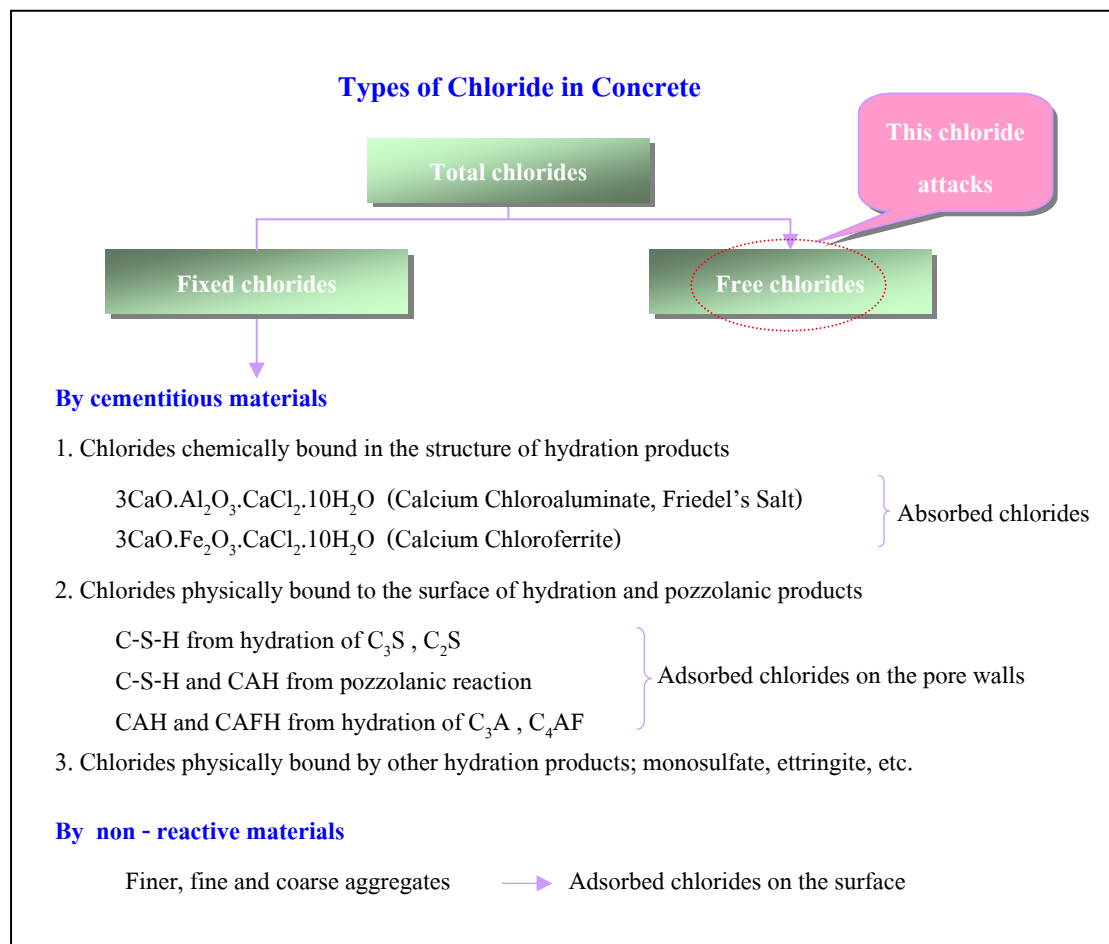
### แหล่งที่มาของคลอไรด์

ขณะอนุกรมการคอนกรีตและวัสดุ(2543) คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่นในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หรือที่ปนเปื้อนมากับหิน ทราช(โดยเฉพาะทรายที่มีแหล่งที่มาจากบริเวณใกล้ทะเล) รวมถึงมีแหล่งที่มาจากน้ำยาผสมคอนกรีตบางประเภท เช่น แคลเซียมคลอไรด์( $\text{CaCl}_2$ )ที่พบอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจากสภาพแวดล้อมภายนอกคอนกรีต ในช่วงของการใช้งาน เช่น จากน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ในการช่วยละลายน้ำแข็ง(De-Icing Salt)ในประเทศที่มีอากาศหนาว ทั้งนี้โดยทั่วไปแล้วแหล่งคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างนั้น

มาจากน้ำทะเล ซึ่งสำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้ว่าคลอไรด์จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ แต่เนื่องจากไม่มีปริมาณของออกซิเจนที่เพียงพอหรือไม่มี การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็จะไม่เกิดขึ้น

CPAC(2543) โดยทั่วไปแล้วเราทราบว่าปริมาณของคลอไรด์มีมากในน้ำทะเลคือมีประมาณ 90% ซึ่งสารประกอบต่างๆของคลอไรด์ในน้ำทะเลประกอบด้วย เกลือของคลอไรด์ในรูปของสารประกอบโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)ประมาณ 27,000 ppm. แมกนีเซียมคลอไรด์(MgCl<sub>2</sub>)ประมาณ 3,200 ppm. และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl<sub>2</sub>)ประมาณ 500 ppm.

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ(2543) ซึ่งปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในเนื้อของคอนกรีต(Total chloride)ดังกล่าวนี้ เป็นผลรวมของคลอไรด์ในสองประเภทคือ 1.Bound chloride คือคลอไรด์(ในบางส่วน) ส่วนที่ถูกจับยึดอยู่ในผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน และที่เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนไปในรูปของ Calcium Chloro-Aluminate Hydrate (Friedel's salt) หรือถูกดูดซับด้วยผิวของ gel pores ซึ่งคลอไรด์ในส่วนนี้จะไม่มีผลต่อการเกิดสนิม 2.Free chloride คือคลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำในโพรงของคอนกรีต (Pore Solution) คลอไรด์ในส่วนนี้สามารถที่จะแพร่เข้าไปยังคอนกรีต ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเข้มข้นของคอนกรีตลดลง ดังนั้นหากเราสามารถจับยึดคลอไรด์ในส่วนนี้ไว้ได้เป็นจำนวนมาก ก็จะสามารถช่วยยืดระยะเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้



รูปที่ 2. แสดงที่มาของคลอไรด์  
(ที่มา : <http://www.bucc4.buu.ac.th~twc,2547>)

## ปริมาณของคลอไรด์ตามที่มาตรฐานกำหนด

คณะกรรมการการคอนกรีตและวัสดุ(2540) ระบุปริมาณการปนเปื้อนของคลอไรด์ในน้ำที่ใช้สำหรับผสมคอนกรีต ควรมีปริมาณไม่เกินค่าต่อไปนี้

ตารางที่ 1. แสดงปริมาณสารที่ขอมให้ในน้ำสำหรับผสมคอนกรีต

ชื่อสาร	ปริมาณที่ขอมให้(ppm.)
-คลอไรด์	
-สำหรับงานคอนกรีตอัดแรงหรืองานสะพาน	500
-สำหรับงานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป	1,000

(ที่มา : มาตรฐาน ว.ส.ท. 1014-40 , 2540)

แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นปริมาณรวมของคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีต ในขณะที่ผสมคอนกรีต(ไม่รวมรวมถึงคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจากภายนอก ในภาวะการใช้งานของโครงสร้าง) ต้องมีไม่มากเกินไปกว่าที่มาตรฐานกำหนดดังต่อไปนี้

-สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา หรือคอนกรีตอัดแรงแบบอัดแรงทีหลัง(Post-tension) ปริมาณคลอไรด์รวมในคอนกรีตต้องไม่เกิน 0.60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

-สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องการความทนทานสูง หรือคอนกรีตอัดแรงแบบอัดแรงก่อน(Pre-tension) หรือคอนกรีตอัดแรงแบบอัดแรงทีหลัง (Post-tension) ที่ต้องสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่มีคลอไรด์ ปริมาณคลอไรด์รวมในคอนกรีตต้องไม่เกิน 0.30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

อนึ่งในกรณีของคอนกรีตผสมเสร็จ มาตรฐานดังกล่าวแนะนำว่าควรควบคุมปริมาณคลอไรด์ไว้ไม่ให้มากกว่า 0.30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ยกเว้นได้รับอนุมัติจากผู้ใช้อาจควบคุมไว้ไม่เกิน 0.60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

Emmons(1993, อ้างถึงใน สืบศักดิ์,2544) ถึงอย่างไรก็ดีแล้วแต่ได้มีการศึกษาวิจัย และพบว่าถึงแม้คอนกรีตจะมีค่าความเป็นด่างสูง(ph = 13.20) ก็สามารถที่จะเกิดการสึกกร่อนของเหล็กเสริมได้ ถ้าหากมีปริมาณของคลอไรด์สูงอยู่ที่ประมาณ 8,000 ppm. และในขณะที่เดียวกันหากคอนกรีตมีความเป็นด่างลดลงเพียงเล็กน้อย (ph = 11.60) การสึกกร่อนของเหล็กเสริมจะเกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณของคลอไรด์เพียง 71 ppm. เท่า

## การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

กมล(2545) คลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลักในน้ำทะเล(และในน้ำกร่อย) ซึ่งมีความสามารถที่จะแทรกซึมเข้าสู่ภายในเนื้อของคอนกรีตได้ ถ้าหากว่าอยู่ในสภาพหรือมีปัจจัยที่เหมาะสม โดยคลอไรด์ที่มีบทบาทที่สำคัญในการทำลายจะเป็นในส่วนของคลอไรด์อิสระ(Free Chloride) ซึ่งการทำลายดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต

Soroka (1993) การซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ มีน้ำอยู่ในระบบโพรงที่อยู่หนึ่ง ในคอนกรีตที่ค่อนข้างแห้งน้ำจะเป็นตัวพาคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีต และเมื่อคอนกรีตอิ่มตัวด้วยน้ำ น้ำจะ

เป็นตัวกลางให้คลอไรด์ไอออนผ่านเข้าไปในคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้งจะเกิดกลไกทั้งสองกรณี ซึ่งอัตราการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

สุวิมล และคณะ(มปป.) การซึมผ่านของคลอไรด์ไอออน ขึ้นกับคุณสมบัติของคอนกรีตในหลายๆด้าน เป็นต้นว่าด้านความพรุนของเนื้อคอนกรีตเอง ชนิดของปูนซีเมนต์ สภาพของการบ่ม สภาพของอุณหภูมิทั้งในขณะผสม-เท-บ่ม ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์โดยรอบ เป็นต้น ซึ่งหากคลอไรด์ไอออนมีปริมาณที่เพียงพอแล้ว จะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิมได้

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ(2543) , ทวีชัย(2547) โดยทั่วไปแล้วรูปแบบของการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนนั้นสามารถแบ่งออกได้ใน 4 ลักษณะดังนี้

1. โดยการแพร่กระจาย(Diffusion) : เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างปริมาณของความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีต
2. โดยการเคลื่อนย้าย(Migration) : เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างทางศักย์ไฟฟ้า(หรือปริมาณของไอออน)ในคอนกรีต
3. โดยการพา(Convection) : เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเกิดวัฏจักรเปียกสลับแห้งในคอนกรีต ซึ่งนำไปสู่กระบวนการเกิด Capillary Suction นั้นเอง
4. โดยการซึมผ่าน(Permeability) : เกิดขึ้นเนื่องจากผลของความแตกต่างทางด้าน hydraulic pressure ในคอนกรีต

Chindaprasirt et al.(2000) หาปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออน เข้าสู่เนื้อของคอนกรีตเนื่องจากการแพร่ โดยใช้กฎข้อสองของฟิค ( Fick'2<sup>nd</sup> law )ดังนี้

$$C(x,t) = C_s \left[ 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{x}{2\sqrt{D_t}} \right] \right] \quad \text{สมการที่ 1.}$$

เมื่อ

$C(x,t)$  = ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนที่ระยะ x และเวลา t ใดๆ

$C_s$  = ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนที่ผิวสัมผัส

t = ระยะเวลาที่สัมผัส

x = ระยะที่คลอไรด์เคลื่อนที่เข้าไปในคอนกรีต

erf = ฟังก์ชันคลาดเคลื่อน

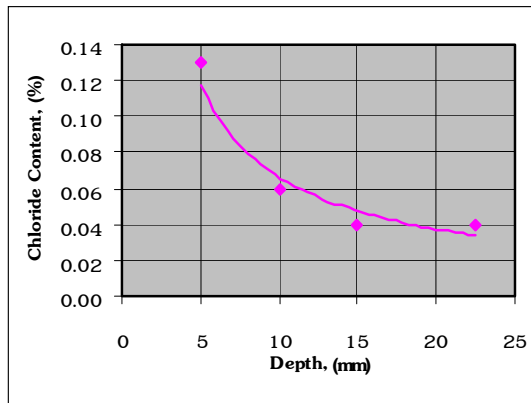
D = สัมประสิทธิ์การแพร่

### การวัดระยะที่คลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าสู่คอนกรีต

สุวิมล และคณะ(มปป.) วิธีที่ง่ายในการระบุความลึก ที่คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตโดยประมาณคือ การใช้ไนยาซิลเวอร์ไนเตรด(Silver nitrate) นีคลงบนผิวของคอนกรีตที่เราทำการสกัดเตรียมผิวไว้แล้ว

ชัยชาญ(2546, อ้างถึงใน ปริญญา, 2547) โดยคอนกรีตที่คลอไรด์ซึมผ่านถึงเมื่อทำปฏิกิริยากับสารดังกล่าวจึงจะมีสี ซึ่งโดยทั่วไปแล้วน้ำยาซิลเวอร์ไนเตรต(Silver nitrate) ที่ใช้จะมีความเข้มข้น 0.1N และระยะที่สารละลายดังกล่าวเปลี่ยนเป็นสีเทา คือระยะที่คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีต

ณัฐมนต์ และจุลเศรษฐ์(2545) การตรวจสอบปริมาณ Chloride สามารถกระทำได้ง่าย ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า Chloride Analyser หรืออาจใช้ขบวนการทางเคมีในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C 114 ก็ได้(ดูรูปที่ 3. ประกอบ) โดยนำคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ มาทดสอบหาปริมาณ Chloride และหากเราทำการพล็อตกราฟเทียบกับระยะความลึก ก็จะได้แนวโน้มของการซึมผ่านของ Chloride ซึ่งจะช่วยให้เราสามารถประเมินระยะเวลาที่เหลืออยู่ ก่อนที่เหล็กเสริมจะเกิดการผุกร่อนเป็นสนิมได้โดยประมาณ ซึ่งเกณฑ์ในการพิจารณาปริมาณ Chloride ions สูงสุดที่ยอมรับได้คือไม่เกิน 0.4% ต่อน้ำหนักของซีเมนต์



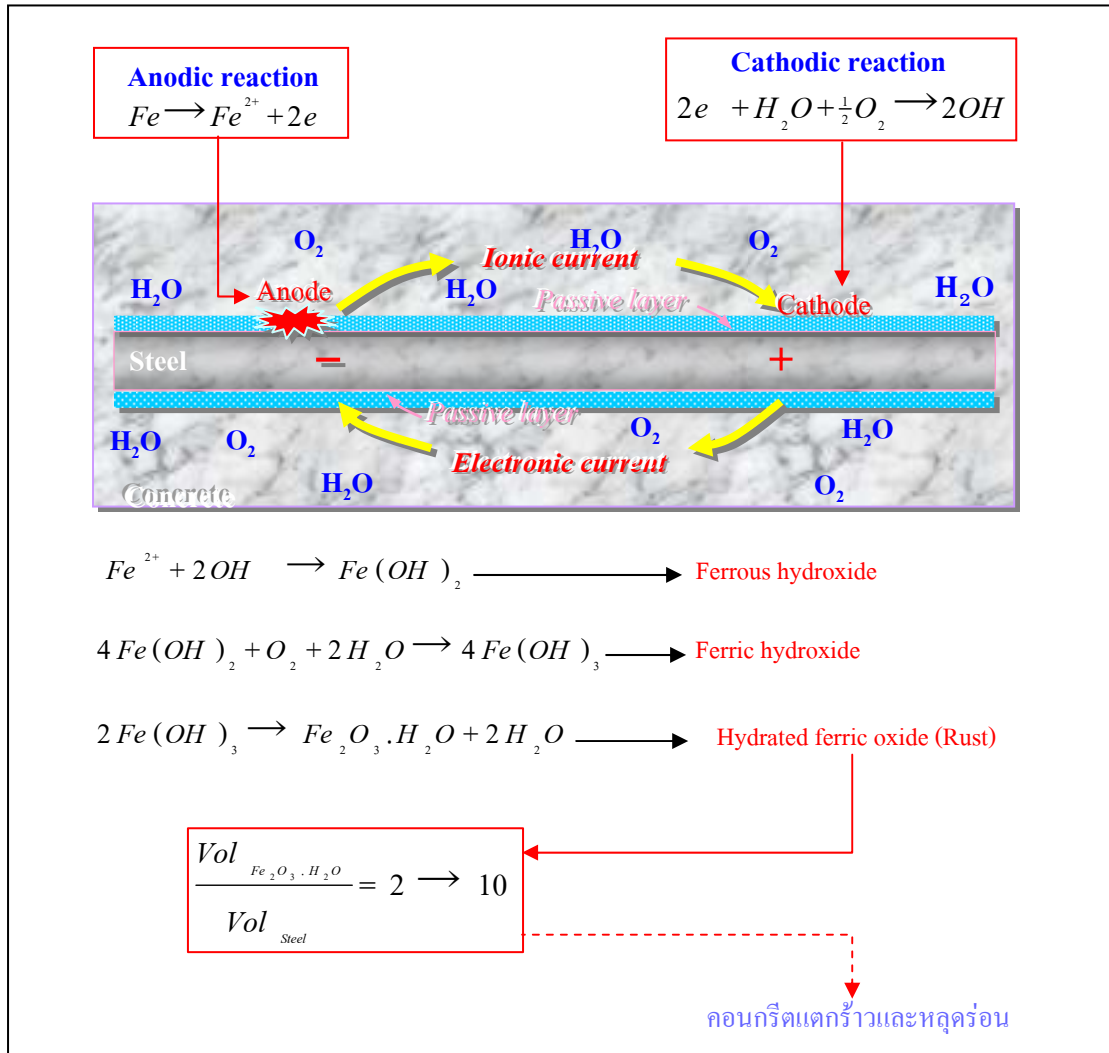
รูปที่ 3. การทดสอบ Chloride Content ในห้องปฏิบัติการ  
(ที่มา : ณัฐมนต์ และ จุลเศรษฐ์, 2545)

### ปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์

ณัฐมนต์ และจุลเศรษฐ์(2545) ปริมาณของ Chloride เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการผุกร่อนเป็นสนิมของเหล็กเสริม(ดูรูปที่ 4. ประกอบ) และถ้าหากว่ามีปริมาณมากพอในระหว่างการผสมคอนกรีต อาจมีผลทำให้ Passivity Film ไม่เกิดขึ้นได้

ทวีชัย(2547) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของ “ปฏิกิริยาไฟฟ้า-เคมี” โดยมีคลอไรด์ประพุดิตัวในลักษณะคล้ายๆกับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อน

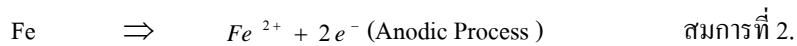
คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ(2543),ชัยชาญ(2546) โดยปกติแล้วเหล็กเสริมในคอนกรีต จะมีชั้นของฟิล์มออกไซด์ (Protective Passivity Layer) บางๆ เคลือบอยู่ที่ผิวของเหล็กเสริมเรียกว่าฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) แต่เมื่อใดก็ตามหากคลอไรด์ไอออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนถึงผิวของเหล็กเสริมได้(ดังแสดงในรูปที่ 4.) ชั้นของฟิล์มออกไซด์ดังกล่าวจะถูกทำลาย จนกระทั่งเมื่อใดที่ชั้นฟิล์มดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าระดับวิกฤติ(Critical Level) เหล็กเสริมในบริเวณนั้นก็จะเกิดสนิมได้ซึ่งเราเรียกว่า Depassivation และในขณะเดียวกันหากบริเวณดังกล่าวมีออกซิเจนและความชื้นในปริมาณที่เหมาะสม กระบวนการทางไฟฟ้า-เคมีก็จะเกิดขึ้น



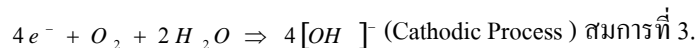
รูปที่ 4. แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

(ที่มา : <http://www.bucc4.buu.ac.th~twc,2547>)

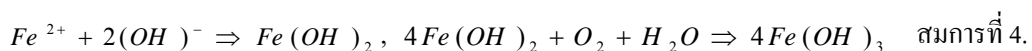
กล่าวคือบริเวณที่ฟิล์มถูกทำลายจะมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วลบเราเรียกว่า “ปฏิกิริยาอโนด ( Anodic Reaction )” สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



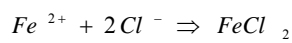
อิเล็กตรอน(e-)ที่เกิดขึ้นนี้ จะวิ่งผ่านไปยังบริเวณที่ฟิล์มไม่ได้ถูกทำลาย ซึ่งมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วบวก ( Cathodic ) หากมันสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนได้ ก็จะเกิดเป็น “ไฮดรอกไซด์ไอออน  $[OH^-]$ ” ดังสมการ



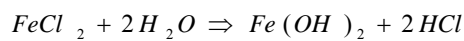
และในขณะที่เดียวกัน  $Fe^{2+}$  ที่เกิดที่ขั้วลบส่วนหนึ่ง ก็จะทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจน กลายเป็น “เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ( Ferric Hydroxide )” ดังสมการ



ยังไม่พอ  $Fe^{2+}$  ที่เกิดอีกส่วนหนึ่งที่ขั้วลบก็จะทำปฏิกิริยากับ  $Cl^-$  เกิดเป็น “เฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_2$ )” และเมื่อสารประกอบดังกล่าวทำปฏิกิริยากับน้ำ ก็จะกลายเป็นสนิมเหล็กเพิ่มเติมดังสมการ



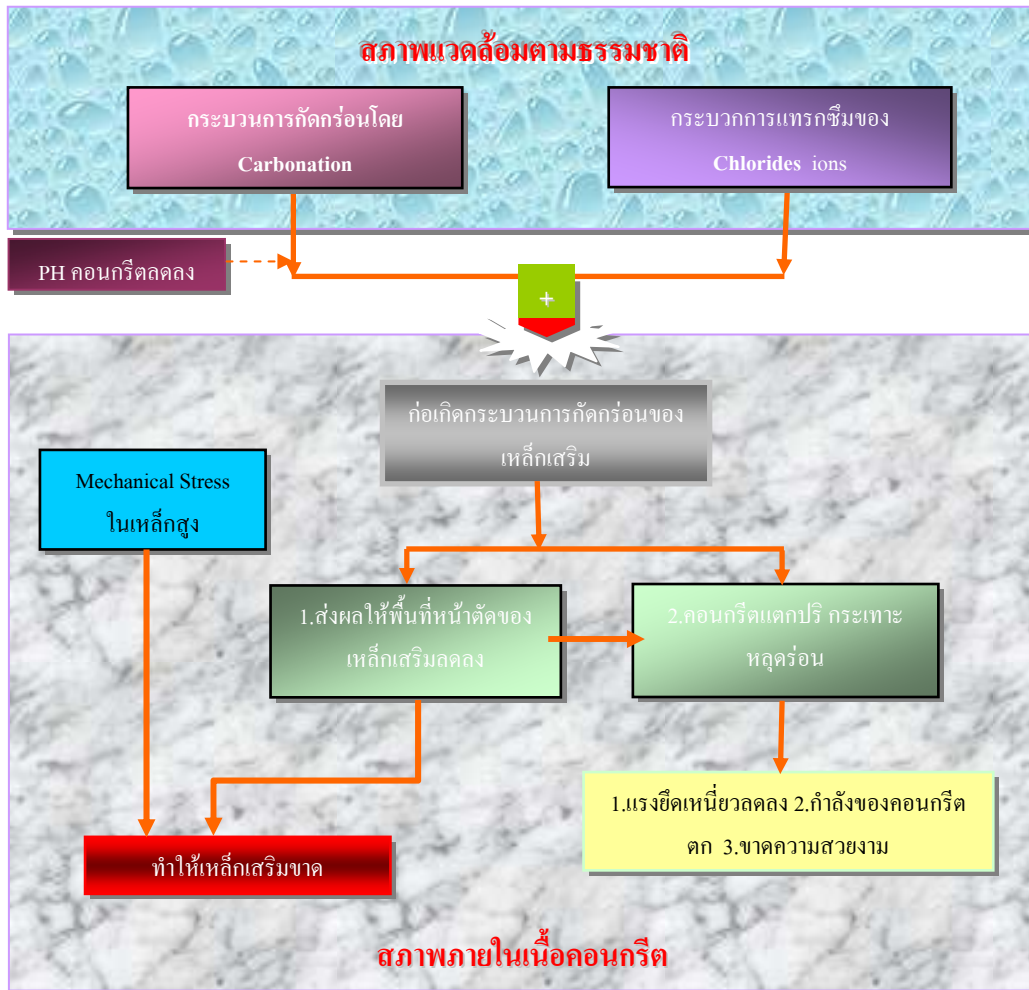
สมการที่ 5.



สมการที่ 6.

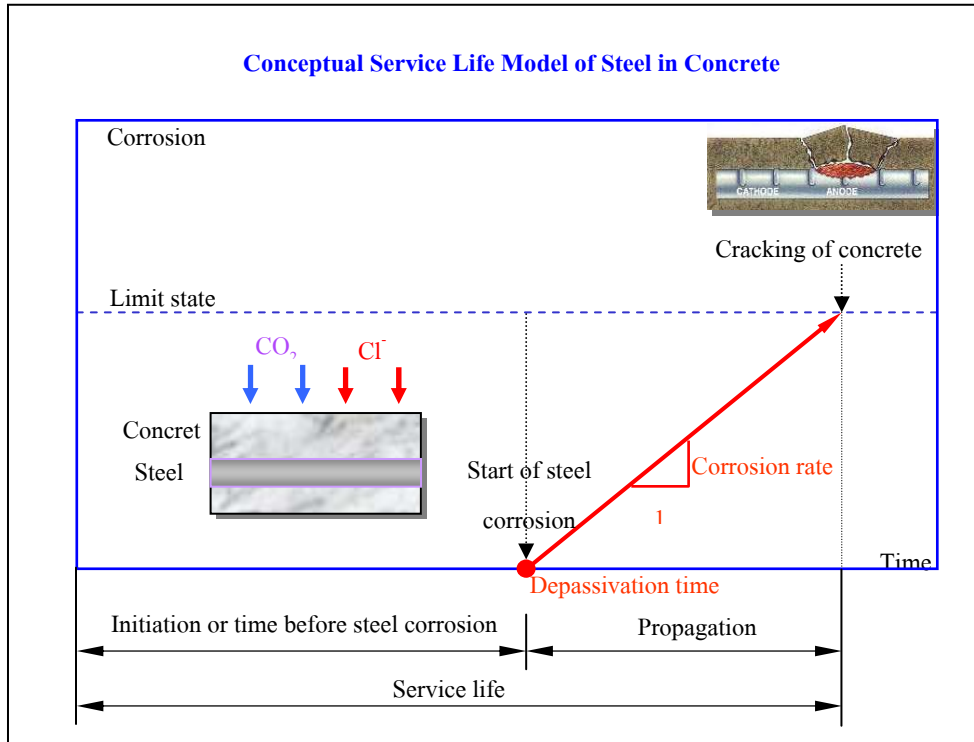
### กลไกการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์

โดยหลักการแล้ว การโจมตีด้วยคลอไรด์ไอออน(ที่มีส่วนทำให้ค่า pH ลดลงด้วยเช่นกัน) มุ่งหวังผลไป ที่การทำลายเหล็กเสริมคอนกรีตเป็นสำคัญ ส่วนการเกาะห่อหรือหลุดร่อนของเนื้อคอนกรีตนั้น เป็นเพียง ผลกระทบต่าง



รูปที่ 5. แสดงแผนภาพกระบวนการกัดกร่อนเหล็กเสริมคอนกรีต

Funahashi M.(1990) การเกิดสนิมแบ่งเป็นสองขั้นตอนคือ 1.Initial period จะเริ่มเมื่อคลอไรด์ไอออนซึมผ่านเข้าไปสะสมในเนื้อคอนกรีตจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤติ(Threshold) ที่ปริมาณคลอไรด์ในช่วงตั้งแต่ 0.2-1.33 กก./ม.<sup>3</sup> หรือตั้งแต่ 75-1175 ppm ของคอนกรีต ซึ่งเป็นระดับที่ฟิล์มออกไซด์ที่เคลือบตามผิวเหล็กเสริมเสียหาย หลังจากนั้นตามด้วย 2.Propagation period ซึ่งเป็นปฏิกิริยาทางไฟฟ้า-เคมี ส่งผลให้เกิดสนิมเหล็กอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 6. แสดงแบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต  
(ที่มา : <http://www.bucc4.buu.ac.th~twc,2547>)

Tangtermsirikul และ Plangngern(1999) ได้นำเสนอสมการที่ใช้สำหรับคำนวณหา ปริมาณของคลอไรด์ระดับวิกฤต(Chloride corrosion threshold) ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของ “ไฮดรอกซิล(hydroxyl)” ในโพรงคอนกรีต(ดูรูปที่ 7. ประกอบ)ดังนี้

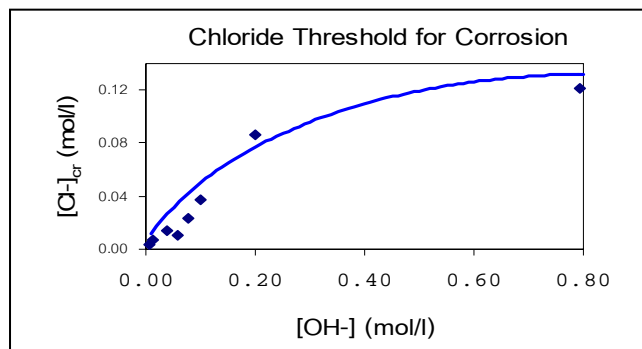
$$[Cl]_{cr} = 0.1716 [OH^-]^{0.7619} \quad \text{สมการที่ 7.}$$

เมื่อ

$[Cl]_{cr}$  = ความเข้มข้นวิกฤตของคลอไรด์(critical chloride concentration), mol/l

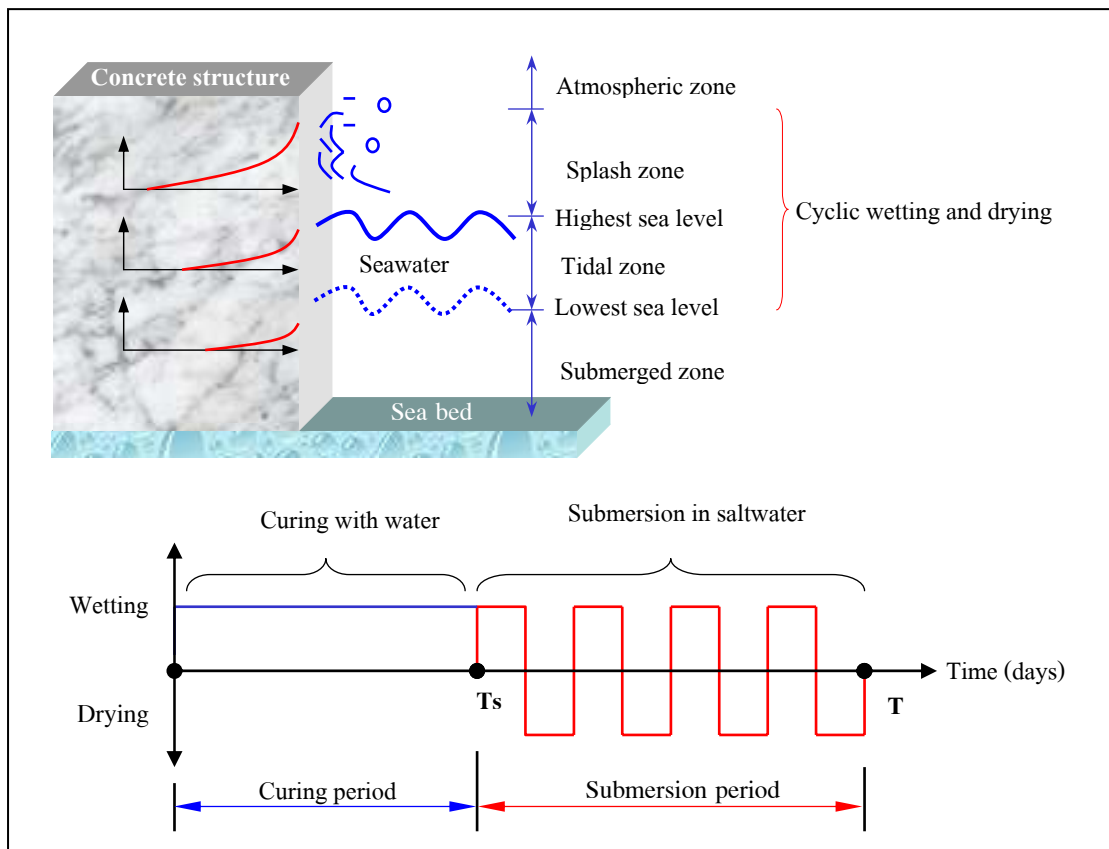
$[OH^-]$  = ความเข้มข้นของไฮดรอกซิล(hydroxyl concentration), mol/l

และต้องมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมคือ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 70-80%(Optimum relative humidity is 70-80%) พร้อมกับปริมาณของออกซิเจนที่เหมาะสมด้วย



รูปที่ 7. เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $[Cl]_{cr}$  กับ  $[OH^-]$   
(ที่มา : Tangtermsirikul and Plangngern , 1999)

สถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย สวทช.(2539) โครงสร้างคอนกรีตส่วนที่เผชิญสภาพแวดล้อมของทะเล(ดูรูปที่ 8. ประกอบ)ที่นับว่ารุนแรงในแง่ของการเกิดสนิมคือ ส่วนซึ่งมีการเปียกสลับแห้งเป็นวัฏจักร โดยเฉพาะถ้ามีช่วงที่แห้งยาวนานกว่าช่วงที่เปียก การเกิดสนิมก็จะยิ่งรุนแรงมากขึ้น ซึ่งทำให้สามารถจัดระดับส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเรียงกันลงไปตามลำดับที่ต้องเผชิญความรุนแรงจากทะเลได้ดังนี้ 1.ส่วนที่อยู่เหนือผิวน้ำที่สัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล(Splash Zone) 2.ส่วนที่อยู่เหนือผิวน้ำที่อยู่ในบรรยากาศทะเล (Marine Atmospheric Zone) และ 3.ส่วนที่อยู่ระหว่าง ระดับน้ำขึ้นสูงสุดและระดับน้ำลงต่ำสุด (Tidal Zone) ซึ่งในสภาพแวดล้อมเหล่านี้เหล็กเสริมในคอนกรีตมีโอกาสที่จะเกิดสนิมขึ้นได้รวดเร็วกว่า การทำลายโดยน้ำทะเลจะเกิดขึ้นได้ ทั้งจากเกลือซัลเฟตและเกลือคลอไรด์ แต่ต้นเหตุการเกิดสนิมเหล็กมักจะมาจกเกลือคลอไรด์เป็นหลัก ทั้งนี้เนื่องจากน้ำทะเลมีสารละลายคลอไรด์อยู่เป็นส่วนใหญ่ (สูงกว่า 90 %)เมื่อเทียบกับซัลเฟต



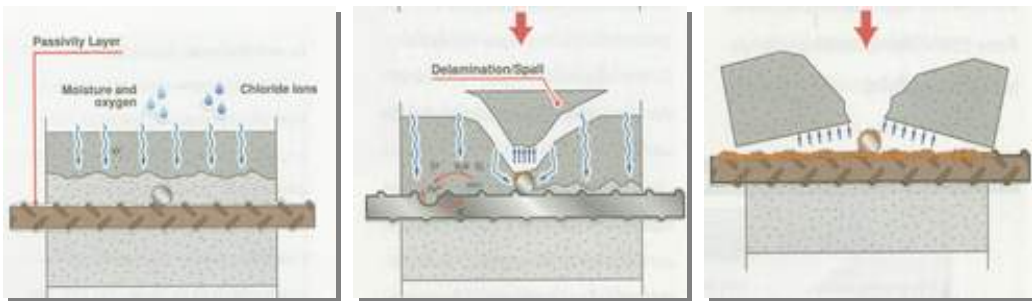
รูปที่ 8. แสดงแบบจำลองของโครงสร้างถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล  
(ที่มา : <http://www.bucc4.buu.ac.th~twc,2547>)

เมื่อคลอไรด์ไอออนอิสระซึมผ่านลึกเข้าไปในเนื้อคอนกรีตถึงระดับใด จะทำให้ความเป็นด่าง(pH) ของคอนกรีต ในส่วนนั้นลดลงเรื่อยๆ จากระดับปกติ คือ 12.5-13.5 ลงไปสู่ระดับ 11 10 และ 9 สารละลายที่มีความเป็นด่างนี้จะเป็นฟิล์มบางๆช่วยป้องกันไม่ให้เหล็กเสริมถูกทำลายด้วยปฏิกิริยา Electrolysis ซึ่งจะทำให้เนื้อเหล็กถูกกัดกร่อนอย่างมาก(ดูรูปที่ 9.-10. ประกอบ)โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความเป็นด่างลดลงถึงระดับวิกฤต(มีค่า pH ต่ำกว่า 9.0) แต่การทำลายจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราส่วน molar ratio ระหว่างคลอไรด์ไอออน

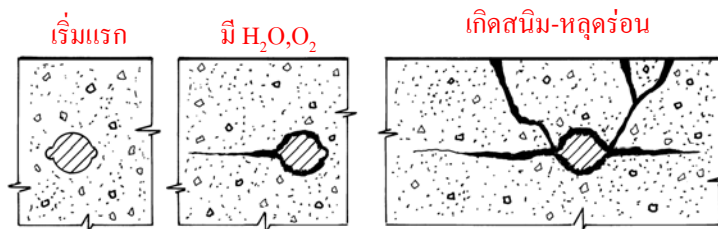
ต่อไฮดรอกซิลไอออน ( $Cl^-/OH^-$ ) เป็นสำคัญ ดังนั้นถึงแม้ค่า pH ในคอนกรีตจะสูงกว่า 11.5 เหล็กเสริมก็ยังมีโอกาส เกิดเป็นสนิมได้ ถ้าค่าอัตราส่วนนี้สูงกว่า 0.6



รูปที่ 9. แสดงโครงสร้างถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล หรือน้ำกร่อย  
(ที่มา : <http://www.learn.in.th>, 2539)



(ที่มา : <http://www.learn.in.th>, 2539)



(ที่มา : <http://www.corrpro.com>, มปป.)

รูปที่ 10. แสดงกระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย

ส่วน โครงสร้างคอนกรีตที่จมอยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลา (Submerged Zone) หรือ โครงสร้างคอนกรีต ที่อยู่ในบริเวณใต้พื้นทะเล (Sea Bed Zone) จะได้รับความเสียหายจากการทำลายโดยสารละลายซัลเฟตเป็นหลัก มากกว่าที่จะเกิดจากสารละลายคลอไรด์

### ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์

#### 1. ชนิดของปูนซีเมนต์และคุณภาพของคอนกรีต

Soroka(1993) คลอไรด์บางส่วนถูกกักกันหรือดูดกลืนโดยผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่ยังไม่สามารถบอกได้ว่าเป็นการดูดกลืนที่ผิวหรือไม่ แต่คลอไรด์จะเข้ามารวมกับสารผลิตภัณฑ์ของ  $C_3A$  เกือบทั้งหมด กลายเป็นเกลือฟรีเดิล(Friedels Salt) ( $3CaO * Al_2O_3 * CaCl_2 * 10H_2O$ ) หรือสารละลายมี

ความเข้มข้นสูง จะเกิดแคลเซียมออกไซด์ด้วย ความสามารถในการกักเก็บปริมาณคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะขึ้นอยู่กับ  $C_3A$  ยิ่งมากก็ยิ่งดี ดังนั้นถ้าปูนซีเมนต์มีความสามารถกักเก็บมากเท่าไรก็ย่อมจะทำให้การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตได้ช้าลงไปเท่านั้น และจะทำให้ช่วงเริ่มต้น(initial period) ของการกัดกร่อนช้าออกไปอีก Soroka (1993) อ้างจาก Rasheeduzzafar et al. , 1990) แสดงผลเนื่องจากปริมาณของ  $C_3A$  ต่อช่วงเริ่มต้นได้และในที่นี้สามารถสรุปต่อไปได้อีกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาที่มี  $C_3A$  สูงกว่าย่อมดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต

Bakker(1988) ส่วนประกอบของคอนกรีตและอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม มีความสำคัญกับโครงสร้างของโพรง เมื่อเพิ่มระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ความสามารถซึมผ่านได้ลดลง ซึ่งจะเป็นจริงเมื่อคอนกรีตไม่มีการสูญเสียไอน้ำเท่านั้น หากมีการสูญเสียไอน้ำระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเปลี่ยนไปตามระยะของผิว เนื่องจากการลดลงของความชื้นทำให้ความสามารถในการซึมได้เพิ่มมากขึ้น หากบ่มคอนกรีตไว้นานการซึมผ่านคลอไรด์ก็จะลดลง นอกจากนี้การทำให้คอนกรีตแน่นไม่เพียงพอ การแพร่ของคลอไรด์ก็จะเพิ่มขึ้น

### 2.อัตราส่วนของ “น้ำต่อซีเมนต์(w/c)”

Bakker(1988) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และประเภทของปูนซีเมนต์ จะเป็นตัวบอกคุณภาพด้านความซึมผ่านได้ต่ำของคอนกรีต คุณภาพดังกล่าวขึ้นอยู่กับทำให้คอนกรีตแน่นและเงื่อนไขการบ่มความซึมผ่านได้สำหรับคลอไรด์ของคอนกรีตผสมสารปอซโซลานิก ที่มีอย่างดีจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมสารปอซโซลานิกที่มีส่วนผสมเหมือนกัน และพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต ซึ่งมี  $C_3A$  ต่ำ ให้ค่าต่อการต้านทานการแพร่ของคลอไรด์ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

Wongjeeraphat (2002) เถ้าลอยสามารถช่วยลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดี และการเพิ่มปริมาณของเถ้าลอยช่วยลดการซึมผ่านได้ โดยผลกระทบจากปริมาณการแทนด้วยเถ้าลอยระหว่างร้อยละ15-35 โดยน้ำหนัก มีความสำคัญต่อการลดการซึมผ่านได้มากกว่า ผลจากการลดอัตราส่วน w/c

### 3.ระยะหุ้มเหล็กเสริม

Neville(1997) เป็นที่ยอมรับกันว่าคอนกรีตที่ดีต้องมีความทึบแน่นและมีระยะหุ้มเหล็กเสริมที่เหมาะสม จึงสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้

สุวิมล และคณะ(มปป.) เถ้าลอยสามารถลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ ในทุกปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย ระยะหุ้มของเหล็กเสริมมีอิทธิพลต่อแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมสูง และปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการลดค่าความต่างศักย์ค่อนข้างชัดเจน โดยเฉพาะในช่วงอายุต้น ๆ และที่ระยะหุ้มน้อย ๆ สำหรับพฤติกรรมจริงของการเกิดสนิมเหล็ก ค่า w/b และระยะหุ้มเป็นสองปัจจัยที่สำคัญยิ่งต่อการต้านทานการผุกร่อนของเหล็ก เถ้าลอยมีผลกระทบเช่นกันแต่แนวโน้มของอิทธิพลจากสัดส่วนเถ้าลอยยังไม่ปรากฏชัดเจนในช่วงเวลาของการศึกษา

### 4.ตัวการขัดขวางการกัดกร่อน

Soroka(1993) ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีผู้ที่เสนอสารผสมเพิ่มเพื่อต่อต้านกับการเสถียรภาพของคลอไรด์ ไม่ว่าจะเป็นการป้องกันหรือการหน่วงให้เหล็กเสริมได้ผุกร่อนช้าลง มีสารผสมเพิ่ม 2-3 ประเภทที่มีการนำมาใช้ แต่ที่แพร่หลาย คือประเภทไนเตรต ได้แก่ แคลเซียมไนเตรต และมีโซเดียมไนเตรต สรุปว่าไนเตรตอาจขัดขวางการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ นอกจากนี้งานวิจัยใหม่ๆยังชี้ว่าโซเดียมไนเตรต ( $NaNO_2$ ) อาจจะลดหรือป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นได้อย่างสมบูรณ์ก็ได้ Soroka ( 1993) อ้าง

จาก Alonso , Andrade , 1990 ) กล่าวว่าในขณะที่เดียวกันโซเดียมไนไตรต์จะไม่มีประสิทธิผลสำหรับคาร์บอนที่ เกิดในคอนกรีตที่มีคลอไรด์ผสมอยู่

### ผลของการกัดกร่อนหรือทำลายด้วยคลอไรด์

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ(2543) ผลกระทบโดยรวมจากการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วคือ กำลังรับแรงต่างๆของคอนกรีตโดยรวมลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางด้านความต้านทานความล้า(Fatigue Strength) และความสามารถในการแอ่นตัวหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง(Elongation ability)ของโครงสร้างก็ลดลงด้วย รวมถึงความยืดหยุ่น(Stiffness)ก็ลดลงด้วยเช่นกัน ในขณะที่ผลข้างเคียงจากการทำลายโดยกระบวนการดังกล่าวคือการแตกร้าวของคอนกรีต เป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยเร่งให้น้ำและออกซิเจนสามารถเข้าถึงบริเวณผิวของเหล็กเสริมได้เร็วและมากขึ้น ซึ่งยังผลให้มีการเร่งการเกิดของสนิมเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้น

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ(2543) , สถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย สวทช. (2539) การเกิดสนิมเหล็กจะมีผลเสีย ดังนี้ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมบริเวณที่เป็นขั้วลบ (ซึ่งสูญเสียอิเล็กตรอน) จะลดลง ส่วนเหล็กเสริม บริเวณที่เป็นขั้วบวกจะเป็นสนิมพอกพูนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยสนิมจะขยายตัวเพิ่มปริมาณถึง 4-6 เท่า และแรงยึดเหนี่ยว (Bonding) ระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตในส่วนนี้จะลดลงด้วย ในที่สุดโครงสร้างคอนกรีตจะแตกออกด้วยการบ่งตัวของสนิมเหล็ก และเสียความสามารถในการรับกำลังลงไปอย่างมากส่วนโครงสร้างคอนกรีตที่จมอยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลา (Submerged Zone) หรือ โครงสร้างคอนกรีต ที่อยู่ ในบริเวณใต้พื้นทะเล (Sea Bed Zone) จะได้รับความเสียหายจากการทำลายโดยสารละลายซัลเฟตเป็นหลักมากกว่าที่จะเกิดจากสารละลายคลอไรด์

### วิธีป้องกัน

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ(2543) วิธีการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ แบ่งออกได้เป็น 2 แนวทางคือ

#### 1.การปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริม

- 1) โดยการออกแบบและใช้คอนกรีตที่มีความชื้นน้ำต่ำมากๆ เช่น ใช้น้ำในส่วนผสมที่น้อยลงลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ใช้สารประเภท Filler เพื่อเพิ่มความทึบน้ำ เช่น ซิลิกาฟูม การใช้สารปอซโซลานในปริมาณที่เหมาะสม
- 2) การสารผสมเพิ่มบางชนิด เช่น Calcium หรือ Sodium Nitrite ที่ทำให้ปฏิกิริยาอะโนดิกเกิดยาก
- 3) ใช้สารเคลือบผิวคอนกรีต เช่น Epoxy
- 4) ใช้เหล็กเสริมที่ไม่เป็นสนิม หรือเคลือบผิวเหล็กเสริม

#### 2.การแก้ไขโดยอาศัยขบวนการทางไฟฟ้า ซึ่งมีอยู่ด้วยกันใน 3 วิธีคือ

- 1) Cathodic Protection เป็นกระบวนการในการปรับความต่างศักย์ทางไฟฟ้า ทั้งสองขั้วให้เท่ากัน
- 2) Electrodeposition เป็นกระบวนการผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับน้ำทะเล เพื่อสร้างสารบางชนิดจากทะเลขึ้นมาเป็นตัวป้องกันการซึมผ่านของคลอไรด์จากน้ำทะเล

- 3) Desalination and Realkalization เป็นกระบวนการในการสร้างหรือเพิ่มค่าความเป็นด่างให้กับคอนกรีต โดยอาศัยหลักการของระบบกระแสไฟฟ้า

สุวิมล และคณะ(มปป.) ผลของเถ้าลอยที่มีต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม (Corrosion of Steel Reinforcement) ผลการวัดค่าความต่างศักย์ด้วยวิธี Half Cell Potential เพื่อศึกษาแนวโน้มการเกิดสนิมในเหล็กเสริม (สำหรับค่า  $w/b = 0.5$ ) โดยในภาพรวมพอจะกล่าวได้ว่า เถ้าลอยสามารถลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ในทุกค่าของ % fly ash replacement แต่ไม่สามารถบอกได้ชัดเจนว่าความแตกต่างของ % fly ash replacement มีผลกระทบอย่างไร

บุรฉัตร และคณะ(2542) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ ของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของฝุ่นหิน พบว่าการกักเก็บดังกล่าวเกิดจากแรงดูดซับทางกายภาพ(Physical Absorption) ซึ่งทำให้คลอไรด์ถูกจับโดยแรงดึงดูดที่ผิว(Surface force) ฉะนั้นฝุ่นหินที่มีความละเอียดสูงคือมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง จะมีความสามารถในการกักเก็บได้สูง

เจริญวุฒิ และ สุวิมล(มปป.) ได้ศึกษาการใช้ดินขาวผสมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน แล้วพิจารณาในเรื่องความต้านทานการแทรกซึมของไอออนคลอไรด์ สำหรับการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ โดยวิธีเร่งด้วยไฟฟ้า พบว่าการใช้ดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์มีผลต่อการลดลงของประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านก้อนตัวอย่างชัดเจน อาจกล่าวได้ว่า เมื่อใช้ MK แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงถึงร้อยละ 40 จะส่งผลต่อการลดความพรุนจนถึงระดับที่ไม่มีการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ และสำหรับปริมาณ MK 10 -30% ให้ค่าการซึมผ่านอยู่ในระดับต่ำถึงต่ำมากด้วย เมื่อพิจารณาการลดลงของปริมาณประจุไฟฟ้าตามอายุทดสอบแต่ละระดับปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวแล้ว เห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณประจุไฟฟ้าที่ลดลงอย่างมาก เมื่ออายุทดสอบ 28 วัน เทียบกับอายุทดสอบ 7 วัน ซึ่งลดลงประมาณ 34 % , 79% , 79% และ 92 % สำหรับ MK10,20,30 และ 40 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่อายุการทดสอบ 56 วันเทียบกับ 28 วัน พบว่า การเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ยังคงอยู่ในช่วงที่ต่ำมากเช่นกัน

## เอกสารอ้างอิง

- กมล ดำริสถลมารค, 2545. การวิบัติของอาคารและการแก้ไขโครงสร้างคอนกรีตโดยไม่ทำลาย.  
กรุงเทพฯ : ม.ป.ท.(อัสสัมชัญ)
- คณะกรรมการการคอนกรีตและวัสดุ. ความคงทนของคอนกรีต. กรุงเทพฯ: บริษัท จุดทองจำกัด; 2543.
- คณะกรรมการการคอนกรีตและวัสดุ. ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้าง  
คอนกรีต. กรุงเทพฯ: มปพ.; 2540.
- ชัยชาญ โชติถนอม. การศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะคัดขนาด  
[วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา]. ขอนแก่น: บัณฑิตวิทยาลัย  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2546
- ณัฐมนต์ กัมปนานนท์,จุลเศรษฐ์ กฤษณะภักดี. เอกสารประกอบการอบรมเทคนิคและวิธีการทดสอบ  
โครงสร้างคอนกรีตในสนาม. เทคโนโลยีการทดสอบคอนกรีต. สถาบันราชภัฏนครราชสีมา; 2545
- ทวีชัย สาราวานิช. (มปป.). Introduction to Chloride-Induced Corrosion of Steel in Concrete[online].  
(2004, Aug. 20 ). Available URL : <http://www.bucc4.buu.ac.th~twc>.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ. เถ้าลอยในงานคอนกรีต. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย; 2547.
- บุรฉัตร ฉัตรวิระ,สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล และสายัณห์ ทศนโกศล. ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าหิน.  
ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5. ชลบุรี. โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ซิตี้  
จอมเทียน;2542
- สืบศักดิ์ พรหมบุญ. เอกสารประกอบการอบรมเรื่องตัวอย่างการวิบัติของอาคารและวิธีแก้ไข.  
การสำรวจชั้นดิน การออกแบบ และการก่อสร้างงานฐานราก. โรงแรมโซฟิเทลราชาออร์คิด  
ขอนแก่น; 2544
- CPAC. (2000). คอนกรีตสำหรับงานชายฝั่งทะเล. [online]. (2004, Aug. 20 ). Available URL :  
<http://www.cpac.co.th/techno/marine/marine.html>.
- สถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย สวทช. (2537). เทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างงานคอนกรีตสมัยใหม่ :  
การใช้เถ้าลอยจากถ่านหิน(Coal Fly Ash Usage) [online]. (2004, Aug. 20 ). Available URL :  
<http://www.learn.in.th/sample/flyash>.
- A.M.Neville, Properties of concrete, 4 th ed. John Wiley & Sons Inc., Newyork, 1997.
- Bakker RFM. Initiation period. In: Schiessl P, editor. Corrosion of steel in concrete. New York:  
Chapman and Hall; 1988. p. 22-55.
- 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.
- Funahashi M., Predicting corrosion -free service life of a concrete structure in a chloride environment, ACI  
Mat.J87(6):584-587, 1990.
- R.Wongjeeraphat, Effect of Flyash on chloride ingress, Master Thesis, Kasetsart University Thailand, 2002.
- Soloka I. Concrete in hot environments. Great Britain: Alden Press; 1993

