

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การพัฒนาเครื่องมือวัดอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยใช้หลักการ
ความต้านทานโพลาไรซ์เชิงเส้น

**Development Linear Polarization Resistance Method for Measurement
Corrosions of Steel in Concrete**

คณะผู้วิจัย

สังกัด

ผศ.จักรพันธ์ แสงสุวรรณ

มทร.ราชมงคลพระนคร

นายสุภชัย

หอวิมานพร

มทร.ราชมงคลพระนคร

ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พ.ศ.2554

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในงานวัดอัตราการเป็นสนิมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทั่วไป มักจะได้รับผลกระทบจากการเกิดสนิมของเหล็กเป็นส่วนมากเป็นผลให้กำลังของโครงสร้างคอนกรีตลดน้อยมีการพบการเสื่อมสภาพของโครงสร้างจากเหล็กเสริมเป็นสนิมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเล โดยสาเหตุสำคัญส่วนใหญ่ที่ทำให้เหล็กเกิดสนิมมักเกิดจากคลอไรด์ซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปถึงเหล็กเสริมและเมื่อคลอไรด์ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนถึงระดับของเหล็กเสริมมีปริมาณมากเพียงพอที่จะทำลายฟิล์มที่ป้องกันที่ผิวเหล็กเสริม และทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเกิดสนิมสะสมเพิ่มขึ้นเพียงพอที่จะทำให้เกิดหน่วยแรงและดันให้คอนกรีตเกิดความเสียหายเป็นผลทำให้กำลังของโครงสร้างลดน้อยลงจนไม่สามารถรับกำลังได้อีกและโครงสร้างจะเกิดการวิบัติในภายหลัง

ในการบำรุงรักษาซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตในปัจจุบันมีค่าใช้จ่ายสูงมาก โดยเฉพาะงบประมาณที่อยู่ในส่วนของระบบสาธารณูปโภค เช่น สะพาน ถนน โครงสร้างอาคารที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล เป็นต้น การที่จะทำให้คอนกรีตโครงสร้างที่เสื่อมสภาพกลับคืนมาอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ นั้นต้องมีการวางแผนในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมที่ดี จะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้เป็นอย่างมาก ดังนั้นการเสื่อมสภาพของโครงสร้างเนื่องจากสนิมจึงกลายเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาและแก้ไขอย่างเร่งด่วนเพราะโครงสร้างคอนกรีตที่เสื่อมสภาพในลักษณะนี้มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นทุกๆ ปี ในการพิจารณาสถานะภาพเสื่อมสภาพของโครงสร้างเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการตัดสินใจต้องใช้เครื่องมือที่สามารถตรวจสอบหาสถานะการเสื่อมสภาพได้ใกล้เคียงความจริง ซึ่งในปัจจุบันนี้เครื่องมือที่ใช้วัดค่าอัตราการเกิดสนิมมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศแต่สำหรับประเทศไทยยังไม่มี การนำเข้าเครื่องมือดังกล่าวนี้มาใช้ เนื่องจากราคาแพงมากและผู้ใช้ต้องมีความรู้ทางด้านนี้พอสมควร สำหรับประเทศไทยพบว่าในภาคของการศึกษาและภาคอุตสาหกรรมยังไม่มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาเครื่องมือวัดอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังนั้นการสร้างและพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องมือที่ใช้วัดค่าอัตราการเกิดสนิมจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง และเป็นเหตุผลหลัก ที่ควรให้ความสำคัญและส่งเสริมให้นักวิจัยได้ทำการสร้างและพัฒนาเครื่องมือตลอดจน ศึกษาวิจัยเพื่อตรวจสอบและพิสูจน์เพื่อให้ได้ผลใกล้เคียงความจริง และที่สำคัญยิ่ง ยังช่วยลดการขาดดุลทางการค้าที่จะต้องนำเข้าเครื่องมือจากต่างประเทศอีกด้วย





สารบัญ

หน้า

สารบัญ	
คำขอบคุณ	
สารบัญตาราง	
สารบัญรูปภาพ	
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย	3
บทที่ 2 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต	
2.1 การตรวจประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต	4
2.2 หลักการของการเกิดสนิม	4
2.3 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์	7
2.4 หลักการโพลาไรซ์เซชัน	8
2.5 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต	10
2.6 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมเหล็ก	14
2.7 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม	18
บทที่ 3 การตรวจวัดและแจ้งเตือนสนิมในคอนกรีต	
3.1 วิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	19
3.2 ความต้านทานของคอนกรีต	24
3.3 ความต้านทานโพลาไรซ์เซชัน	27
3.4 การประเมินค่าแบบทาเฟล	30
3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทาน	32
3.6 วิธีการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต	33
3.7 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความต้านทานโพลาไรซ์	36
3.8 พื้นที่สนามไฟฟ้า	39



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 วงจรไฟฟ้าและระบบการประมวลผลโปรแกรม	
4.1 วงจรแบ่งแรงดันและกระแสไฟฟ้า	43
4.2 วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลและสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก	45
4.3 โปรแกรมคอนโทรลเลอร์	47
4.4 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	48
4.5 หม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบค	51
4.6 เลือกขนาดการทนกำลังของอุปกรณ์กำลัง	55
4.7 การประมวลผลโปรแกรม	55
บทที่ 5 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย	
5.1 การออกแบบจัดสร้างเครื่องมือวัด	61
5.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับใช้ทดสอบเครื่องมือวัดค่าโพลาไรซ์เซชัน	65
5.3 วัสดุและปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีต	66
5.4 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก	67
5.5 วิธีการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า	69
5.6 การวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์	71
บทที่ 6 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	
6.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	73
6.2 ค่าความต้านทานโพลาไรซ์เซชัน (RP)	78
6.3 บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	86
6.4 ข้อเสนอแนะ	86
บรรณานุกรม	88
ภาคผนวก ก	92
ภาคผนวก ข	107
ภาคผนวก ค	124



คำขอบคุณ

รายงานฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความอนุเคราะห์จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ในการให้ทุนอุดหนุนวิจัยและสนับสนุนโครงการวิจัยมาโดยตลอด และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหิดล เป็นจุดเริ่มต้นที่ได้แนะนำการวัดแบบโพลาไลต์เซชัน ซึ่งเป็นการจุดประกายแนวความคิดและเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับผู้วิจัยความสำเร็จอย่างดียิ่งของการวิจัยส่วนหนึ่งเกิดจากความอนุเคราะห์ในการประสานงานของผู้ร่วมวิจัยและที่ปรึกษาทุกท่านที่ได้ให้ข้อคิดเห็นและเสนอแนะสิ่งที่มีคุณค่า ซึ่งผลที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้น เพื่อที่จะได้ศึกษาในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับไม้เนื้ออ่อนที่โตเร็วให้เกิดประโยชน์สูงสุด สำหรับการทดสอบและการจัดเก็บรวบรวมข้อมูลจากหน่วยงานต่างๆ รวมทั้งการคัดข้อมูล การจัดเก็บข้อมูลอย่างมีระบบและมีประสิทธิภาพโดยผู้ช่วยวิจัยทุกท่าน

คณะผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าเอกสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการด้านวิศวกรรม สถาปัตยกรรม วงการก่อสร้าง และเป็นแนวทางการตรวจสอบการใช้งานของสิ่งปลูกสร้างที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก และเครือข่ายประโยชน์ทางเศรษฐกิจแก่ประเทศไทยต่อไป

จักรพันธ์ แสงสุวรรณคณะ

23 กันยายน 2554



สารบัญรูปภาพ

	หน้า	
ภาพที่ 2.1	แผนภาพที่แสดงระบบของเซลล์กัลวานิก; การเกิดปฏิกิริยา Oxidation ที่ขั้ว anode และการเกิดปฏิกิริยา Reduction ที่ขั้ว cathode	5
ภาพที่ 2.2	เซลล์ตัวนำไฟฟ้า	8
ภาพที่ 2.3	กราฟเส้น โพลาริซสำหรับ Short-Circuited Electrolytic Cell แสดงถึงความเสถียรของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม	10
ภาพที่ 2.4	กระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนบนผิวเหล็ก	12
ภาพที่ 2.5	ปริมาณของเหล็กเสริมที่เกิดสนิม	13
ภาพที่ 2.6	เซลล์ตัวนำไฟฟ้าที่ทำให้เหล็กเกิดสนิมในคอนกรีต	14
ภาพที่ 2.7	รูปแบบจำลองกระบวนการเกิดสนิมของเสริมเหล็กในคอนกรีต	15
ภาพที่ 2.8	รูปแบบจำลองระยะเวลาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต	16
ภาพที่ 2.9	แบบจำลองกระบวนการเสื่อมสภาพ โดยคลอไรด์สำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะหุ้มคอนกรีตหนา 2 นิ้ว (50 มม.)	17
ภาพที่ 2.10	กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม	18
ภาพที่ 3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้ทดสอบด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ตามมาตรฐาน ASTM C 876 โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต	19
ภาพที่ 3.2	ตัวอย่างแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าที่สำรวจได้จาก half-cell potential	21
ภาพที่ 3.3	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{corr}) กับศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	23
ภาพที่ 3.4	การทดสอบวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตด้วย 4 ขั้วไฟฟ้า	25
ภาพที่ 3.5	เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{corr}) และค่าความต้านทานของชิ้นส่วนคอนกรีต	27
ภาพที่ 3.6	การวัดค่าความต้านทาน โพลาริซของเหล็กเสริมในคอนกรีต โดยไม่มี guard ring	29
ภาพที่ 3.7	การวัดค่าความต้านทาน โพลาริซด้วยการจำกัดขอบเขตการรับและส่งสัญญาณของกระแสไฟฟ้าจาก Guard ring ไปยังพื้นผิวของเหล็กเสริม	30
ภาพที่ 3.8	วิธีการวัดค่าโพลาริซเชิงเส้นกับการวัดค่ากระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม	32
ภาพที่ 3.9	เทคนิคโพลาริซเชิงเส้นตรงโดยใช้ guard electrode ในการจำกัดกระแสไฟฟ้าจากตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า CE ให้อยู่ภายในบริเวณ GE	33



สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.10 การเปรียบเทียบความต้านทาน Polarization (Rp) โดยวิธี LPR	35
ภาพที่ 3.11 การเปรียบเทียบความต้านทาน Polarization (Rp) โดยวิธี EIS	36
ภาพที่ 3.12 การเปลี่ยนแปลงของ Corrosion Potential ภายหลังจากพื้นผิวคอนกรีตมีความเปียกชื้น.	37
ภาพที่ 3.13 ตำแหน่งของ Probe ที่มีผลกระทบต่อการกระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในคอนกรีต	38
ภาพที่ 3.14 ชิ้นส่วนที่ประกอบรวมกันของ CE และ GE	40
ภาพที่ 4.1 วงจรการแบ่งแรงดันที่มีโหลด	43
ภาพที่ 4.2 ความต้านทานต่อขนานกันหลายตัว	44
ภาพที่ 4.3 การแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อก 4 บิต แบบ R/2R แลคเคอร์	46
ภาพที่ 4.4 อนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล	45
ภาพที่ 4.5 โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์	45
ภาพที่ 4.6 ไคอะแกรมภายใน PLC	48
ภาพที่ 4.7 ขั้นตอนการพัฒนาวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์จากวงจรแบบบั๊ก-บูสต์	48
ภาพที่ 4.8 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ควบคุมแบบแรงดัน	50
ภาพที่ 4.9 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ควบคุมแบบกระแส	50
ภาพที่ 4.10 การเปิดใช้งาน โปรแกรมควบคุมพีแอลซี	56
ภาพที่ 4.11 หน้าจอแรกเมื่อเปิด Software CX-Programmer	56
ภาพที่ 4.12 หน้าจอแรกเมื่อเปิดขยาย Software CX-Programmer	56
ภาพที่ 4.13 Windows ที่ชื่อ Change PLC ขึ้นมาเพื่อให้เลือกรุ่นของ PLC	57
ภาพที่ 4.14 Windows ที่ชื่อ Change PLC ขึ้นมาเพื่อให้เลือกรุ่นของ PLC	57
ภาพที่ 4.15 Click ปุ่ม Setting ที่กรอบของ Network Type แล้ว click tab ที่ชื่อ driver เพื่อเลือก Com Port ที่ต่อจากเครื่อง computer	58
ภาพที่ 4.16 รูปแบบโปรแกรมที่ใช้ในการเขียนงานวิจัย	58
ภาพที่ 4.17 การใช้ในโปรแกรมออกแบบหน้าจอสั่งการสำหรับงานวิจัย	59
ภาพที่ 4.18 เปิดไฟล์หน้าจอสั่งการสำหรับงานวิจัย	59
ภาพที่ 4.19 ตั้งค่าและกำหนดพารามิเตอร์	59
ภาพที่ 4.20 ตั้งค่าและกำหนดพารามิเตอร์ของระบบสั่งการ	60
ภาพที่ 4.21 ตั้งค่าและกำหนดระหว่างหน่วยความจำที่กำหนด	60



สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 5.1 หน้าจอสั่งการและอุปกรณ์ควบคุมที่ใช้สร้างเครื่องมือวัด	61
ภาพที่ 5.2 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและอุปกรณ์การรับค่าสัญญาณจากการวัด	62
ภาพที่ 5.3 ทดสอบการทำงานของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	62
ภาพที่ 5.4 การรับค่าและส่งค่าอนาล็อกเข้าสู่โปรแกรม	62
ภาพที่ 5.5 การรับค่าและส่งค่าอนาล็อกเข้าสู่โปรแกรมจอ	63
ภาพที่ 5.6 การรับค่าและส่งค่าอนาล็อกเข้าสู่โปรแกรมเครื่อง	63
ภาพที่ 5.7 การเขียนโปรแกรมเพื่อสั่งการอุปกรณ์การวัดค่า	64
ภาพที่ 5.8 การเขียนโปรแกรมสั่งงานและแสดงผลการวัดค่าโพลาไรซ์	64
ภาพที่ 5.9 ทดสอบการส่งสัญญาณโพลาไรซ์เข้าสู่คอนกรีตเสริมเหล็ก	65
ภาพที่ 5.10 แสดงการทดลองการวัดและแก้ไขโปรแกรม	65
ภาพที่ 5.11 รายละเอียดคานคอนกรีตเสริมเหล็กและตำแหน่งการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า	68
ภาพที่ 5.12 การเตรียมแบบหล่อคานคอนกรีต	68
ภาพที่ 5.13 การเตรียมตัวอย่างคานคอนกรีตและการเร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า	69
ภาพที่ 5.14 การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือ Half-Cell สำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	69
ภาพที่ 5.15 การวัดการเกิดสนิมด้วยวิธีความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	70
ภาพที่ 5.16 การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือโดยใช้วิธีความต้านทานโพลาไรซ์	71
ภาพที่ 5.17 การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือโดยใช้วิธีความต้านทานโพลาไรซ์	72
ภาพที่ 6.1 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ไม่เร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งจุดมุมของเหล็กเสริม โดยวิธีการของ Half-Cell Potential	76
ภาพที่ 6.2 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ไม่เร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งตรงกลางของเหล็กเสริม โดยวิธีการของ Half-Cell Potential	76
ภาพที่ 6.3 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งจุดมุมของเหล็กเสริม โดยวิธีการของ Half-Cell Potential	77
ภาพที่ 6.4 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งจุดกลางของเหล็กเสริม โดย	



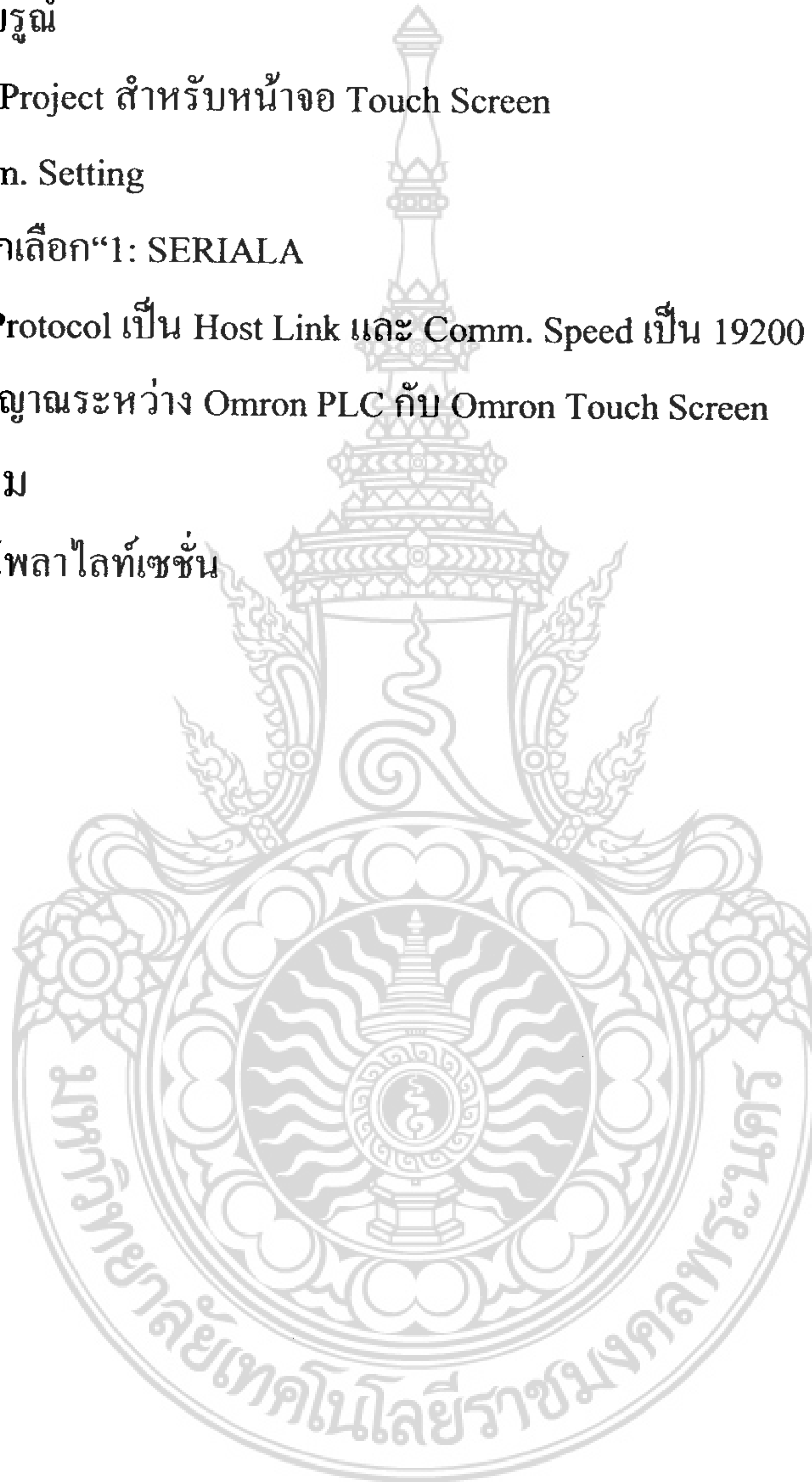
สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
วิธีการของ Half-Cell Potential	77
ภาพที่ 6.5 ความสัมพันธ์ของโพลาไรซ์การเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้ กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งมุมของเหล็กเสริม โดย วิธีการของ LPR	80
ภาพที่ 6.6 ความสัมพันธ์ของโพลาไรซ์การเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้ กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งจุดกลางของเหล็กเสริม โดย วิธีการของ LPR	80
ภาพที่ 6.7 ความสัมพันธ์ของโพลาไรซ์การเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้ กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งมุมของเหล็กเสริม โดย วิธีการของ LPR	81
ภาพที่ 6.8 ความสัมพันธ์ของโพลาไรซ์การเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้ กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งจุดกลางของเหล็กเสริม โดย วิธีการของ LPR	81
ภาพที่ 6.9 ความสัมพันธ์ของโพลาไรซ์การเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้ กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งมุมของเหล็กเสริม โดย วิธีการของ LPR Charge	84
ภาพที่ 6.10 ความสัมพันธ์ของโพลาไรซ์การเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้ กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งจุดกลางของเหล็กเสริม โดย วิธีการของ LPR Charge	85
ภาพที่ 6.11 ความสัมพันธ์ของโพลาไรซ์การเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้ กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งมุมของเหล็กเสริม โดย วิธีการของ LPR Charge	85
ภาพที่ 6.12 ความสัมพันธ์ของโพลาไรซ์การเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้ กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งจุดกลางของเหล็กเสริม โดย วิธีการของ LPR Charge	86
ภาพที่ ข 1 หน้าต่าง Change PLC	108
ภาพที่ ข 2 การเชื่อมต่อ CX-Programmer เข้ากับตัวพีแอลซี	109
ภาพที่ ข 3 การเปลี่ยนโหมดการทำงานของตัวพีแอลซี	109
ภาพที่ ข 4 หน้าต่าง PLC Setting สำหรับพีแอลซีรุ่น CQM1H-CPU21	109



สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ ข 5 การตั้งค่าโหมดการสื่อสาร และความเร็วในการรับส่งข้อมูลร่วมกับ Touch Screen สำหรับพีแอลซีรุ่น CQM1H	110
ภาพที่ ข 6 Verify เสร็จสมบูรณ์	111
ภาพที่ ข 7 Verify” ไม่สมบูรณ์	111
ภาพที่ ข 8 หน้าต่าง “New Project สำหรับหน้าจอ Touch Screen	111
ภาพที่ ข 9 หน้าต่าง “Comm. Setting	112
ภาพที่ ข 10 หน้าต่างเมื่อคลิกเลือก“1: SERIALA	112
ภาพที่ ข 11 การกำหนดค่า Protocol เป็น Host Link และ Comm. Speed เป็น 19200	113
ภาพที่ ข 12 การเดินสายสัญญาณระหว่าง Omron PLC กับ Omron Touch Screen	113
ภาพที่ ข 13 อุปกรณ์ควบคุม	114
ภาพที่ ค 1 เครื่องมือวัดค่าโพลาไรซ์ขั้น	125



สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 3.1	ความสัมพันธ์ความต้านทานของคอนกรีตและความเสี่ยงของการเกิดสนิม	26
ตารางที่ 3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเป็นไปได้ในการเกิดสนิม	26
ตารางที่ 3.3	กระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม เปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขการเกิดสนิมของเหล็กเสริม	36
ตารางที่ 3.4	ค่าความต้านทานโพลาไรซ์ (R_p) ด้วยเครื่องมือ NSC device, ตัวอย่างมอดาร์ขนาดเล็ก	37
ตารางที่ 3.5	ผลกระทบจากการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของ Probe ต่อการวัดค่า R_p โดยใช้เครื่องมือ NSC Device กับจำนวนคอนกรีตหลายตัวอย่าง	38
ตารางที่ 3.6	ความต้านทานโพลาไรซ์ (R_p) ได้จากการวัดโดยเครื่องมือ NSC device ด้วยมอดาร์ตัวอย่างขนาดเล็กโดยใช้ Guard electrode (GE)	41
ตารางที่ 4.1	พิกัดกระแสไฟฟ้าและพิกัดแรงดันไฟฟ้าของมอสเฟตกำลัง ไคโอดกำลัง และไคโอดบริดจ์ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์ที่ใช้ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	55
ตารางที่ 5.1	ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต ต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร	67
ตารางที่ 5.2	คุณสมบัติของเหล็กเสริมคอนกรีต	67
ตารางที่ 6.1	ค่าความต่างศักย์ของไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความน่าจะเป็นเกิดการกัดกร่อน ASTM C 876	73
ตารางที่ 6.2	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	73
ตารางที่ 6.3	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	74
ตารางที่ 6.4	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	74
ตารางที่ 6.5	ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	74
ตารางที่ 6.6	ค่าความต้านทานโพลาไรซ์เซชัน (R_p) ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	79



สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า	
ตารางที่ 6.7	ค่าความต้านทานโพลาไรซ์เชิงเส้น(R_p) ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	79
ตารางที่ 6.8	กระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม เปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขการเกิดสนิมของเหล็กเสริม	82
ตารางที่ 6.9	ค่าอัตราการเกิดสนิม (i_{corr}) ของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	83
ตารางที่ 6.10	ค่าอัตราการเกิดสนิม (i_{corr}) ของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล	83
ตารางที่ ก.1	ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม	93
ตารางที่ ก.2	ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม	94
ตารางที่ ก.3	ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม	94
ตารางที่ ก.4	ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม	94
ตารางที่ ก.5	ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม	95
ตารางที่ ก.6	ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม	95
ตารางที่ ก.7	ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม	96
ตารางที่ ก.8	ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม	96
ตารางที่ ก.9	ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม	97
ตารางที่ ก.10	ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม	97



บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป มักจะได้รับผลกระทบจากการเกิดสนิมของเหล็กเป็นส่วนมากเป็นผลให้กำลังของโครงสร้างคอนกรีตลดน้อยมีการพบการเสื่อมสภาพของโครงสร้างจากเหล็กเสริมเป็นสนิมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเล โดยสาเหตุสำคัญส่วนใหญ่ที่ทำให้เหล็กเกิดสนิมมักเกิดจากคลอไรด์ซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปถึงเหล็กเสริมและเมื่อคลอไรด์ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนถึงระดับของเหล็กเสริมมีปริมาณมากเพียงพอที่จะทำให้ฟิล์มที่ป้องกันที่ผิวเหล็กเสริม และทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเกิดสนิมสะสมเพิ่มขึ้นเพียงพอที่จะทำให้เกิดหน่วยแรงและดันให้คอนกรีตเกิดความเสียหายเป็นผลทำให้กำลังของโครงสร้างลดน้อยลงจนไม่สามารถรับกำลังได้อีกและโครงสร้างจะเกิดการวิบัติในภายหลัง

ในการบำรุงรักษาซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตในปัจจุบันมีค่าใช้จ่ายสูงมาก โดยเฉพาะงบประมาณที่อยู่ในส่วนของระบบสาธารณูปโภค เช่น สะพาน ถนน โครงสร้างอาคารที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล เป็นต้น การที่จะทำให้คอนกรีตโครงสร้างที่เสื่อมสภาพกลับคืนมาอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ นั้นต้องมีการวางแผนในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมที่ดี จะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้เป็นอย่างมาก

ดังนั้นการเสื่อมสภาพของโครงสร้างเนื่องจากสนิมจึงกลายเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาและแก้ไขอย่างเร่งด่วนเพราะโครงสร้างคอนกรีตที่เสื่อมสภาพในลักษณะนี้มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นทุกๆ ปี ในการพิจารณาสถานการณ์เสื่อมสภาพของโครงสร้างเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการตัดสินใจต้องใช้เครื่องมือที่สามารถตรวจสอบหาสถานะการเสื่อมสภาพได้ใกล้เคียงความจริง ซึ่งในปัจจุบันนี้เครื่องมือที่ใช้วัดค่าอัตราการเกิดสนิมมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศแต่สำหรับประเทศไทยยังไม่มีมีการนำเข้ามาเครื่องมือดังกล่าวนี้มาใช้ เนื่องจากราคาแพงมากและผู้ใช้ต้องมีความรู้ทางด้านนี้พอสมควร สำหรับประเทศไทยพบว่าในภาคของการศึกษาและภาคอุตสาหกรรมยังไม่มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาเครื่องมือวัดอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังนั้นการสร้างและพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องมือที่ใช้วัดค่าอัตราการเกิดสนิมจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง และเป็นเหตุผลหลัก ที่ควรให้ความสำคัญและส่งเสริมให้นักวิจัยได้ทำการสร้างและพัฒนาเครื่องมือตลอดจนศึกษาวิจัยเพื่อตรวจสอบและพิสูจน์เพื่อให้ได้ผลใกล้เคียงความจริง และที่สำคัญยิ่ง ยังช่วยลดการขาดดุลทางการค้าที่จะต้องนำเข้าเครื่องมือจากต่างประเทศอีกด้วย



1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้คือ

1. เพื่อพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้วัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต
2. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (Corrosion Potential, E_{corr}) ในเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตโดยวิธีโพลาไรซ์จันต์
3. เพื่อหาความสัมพันธ์ความต้านทานโพลาไรซ์จันต์และอัตราการเกิดสนิม (Corrosion Rate, i_{corr}) ของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นพื้นคอนกรีตที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล โดยวิธีการ 3 LP devices (Linear Polarization Resistance)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาสร้างเครื่องมือเพื่อรับและจ่ายค่าการไหลของกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมเพื่อหาค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต โดยใช้การวัดค่าของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่มีค่าต่ำมาก โดยวิธีการของ 3LP device ด้วยหลักการ Potentiostat หรือ Galvanostatic ตัวอย่างที่ทดสอบใช้การจำลองสภาพแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กให้อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเลด้วยการใช้คลอรีนเป็นส่วนผสมอยู่ในคอนกรีตแทนน้ำทะเลจริงและเร่งการเกิดสนิมด้วยวิธีการทางไฟฟ้าที่แรงดันแตกต่างกัน เนื่องจากมีความจำกัดในด้านระยะเวลา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1.4.1 เป็นองค์ความรู้ใหม่ในการวิจัยต่อไป

ปัจจุบันการวัดค่าการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีตเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายให้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำ แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถทำการวัดจากโครงสร้างจริงได้ แต่ในวิธีการที่มีรูปแบบโดยใช้สนามไฟฟ้าสามารถทำได้ แต่ความถูกต้องแม่นยำขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมหลายสิ่ง ดังนั้นการพัฒนาวิธีการและเครื่องมือให้มีความถูกต้องแม่นยำสูงจะเป็นองค์ความรู้ใหม่ต่อไป ซึ่งในอนาคตสิ่งปลูกสร้างที่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะเกิดการเสื่อมสภาพมากขึ้น ดังนั้นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการเกิดสนิมจะเป็นสิ่งที่บอกถึงอายุการใช้งานของโครงสร้างที่เหลืออยู่ หากเครื่องมือวัดมีประสิทธิภาพของการวัดค่าที่มีความละเอียดสูงก็สามารถที่จะทำนายได้ถูกต้องจึงมีส่วนช่วยสำคัญในด้านความปลอดภัยเป็นอย่างมาก และยังเป็นการศึกษาข้อมูลอย่างเป็นระบบอีกส่วนหนึ่ง



1.4.2 นำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์

เครื่องมือวัดการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต ในประเทศไทย ยังมีการใช้ไม่ เป็นที่แพร่หลาย เนื่องจากต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาแพงมาก ทั้งที่คนไทยก็มีความสามารถที่จะจัดทำเครื่องมือนี้ขึ้นมาได้หากแต่ยังมีปัจจัยในด้านต้นทุนในการวิจัยกันว่าหากมีหน่วยงานที่สนับสนุนให้ทุนวิจัยคนไทยก็สามารถทำได้ซึ่งเป็นการส่งเสริมให้มีเทคโนโลยีเทียบเท่ากับในต่างประเทศ ปัญหาของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยก็จะเหมือนกันกับทุกประเทศทั่วโลก และยังมีแนวโน้มที่จะใช้คอนกรีตเสริมเหล็กเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในปัจจุบัน ซึ่งจะต้องมีการตรวจสอบวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีตให้มีอายุการใช้งานได้นานขึ้นด้วยโครงการวิจัยนี้ จะมีความสอดคล้องกับการผลิตในเชิงพาณิชย์ต่อไป



บทที่ 2

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

2.1 การตรวจประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต

เป็นที่ทราบกันดีว่าการบำรุงรักษาและการบูรณะซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับความเสียหายจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริมให้กลับมามีความแข็งแรงเหมือนสภาพเดิมนั้นต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่ในสถานะสิ่งแวดล้อมทะเล ซึ่งการกำหนดต้นทุนค่าก่อสร้างในแต่ละปีจะประกอบไปด้วยงบประมาณที่ใช้ในการบำรุงรักษาและบูรณะซ่อมแซมโครงสร้างที่เสื่อมสภาพเนื่องจากสนิม ซึ่งใช้งบประมาณในการก่อสร้างมีมูลค่ามากกว่าโครงการก่อสร้างใหม่

ดังนั้นการพัฒนาเครื่องมือเพื่อใช้ตรวจสอบหาค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งเป็นการตรวจสอบด้วยวิธีทดสอบแบบไม่ทำลายสามารถบอกเตือนให้ทราบล่วงหน้าของการเกิดสนิมด้วยการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในต่างประเทศเมื่อประมาณ ค.ศ.1993 โดย (Broomfield JP., et al, 1993) โดยทั่วไปเครื่องมือที่นิยมใช้อาจแบ่งตามวิธีการเป็น 3 วิธีการคือ วิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (half-cell potential) วิธีการวัดค่าความต้านทานของคอนกรีต (Concrete Resistivity) และวิธีการวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์เซชัน (Polarization Resistance)

สำหรับเนื้อหา รายงานวิจัยส่วนนี้ประกอบไปด้วยกลไกการเกิดสนิมและหลักการที่ใช้ในการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

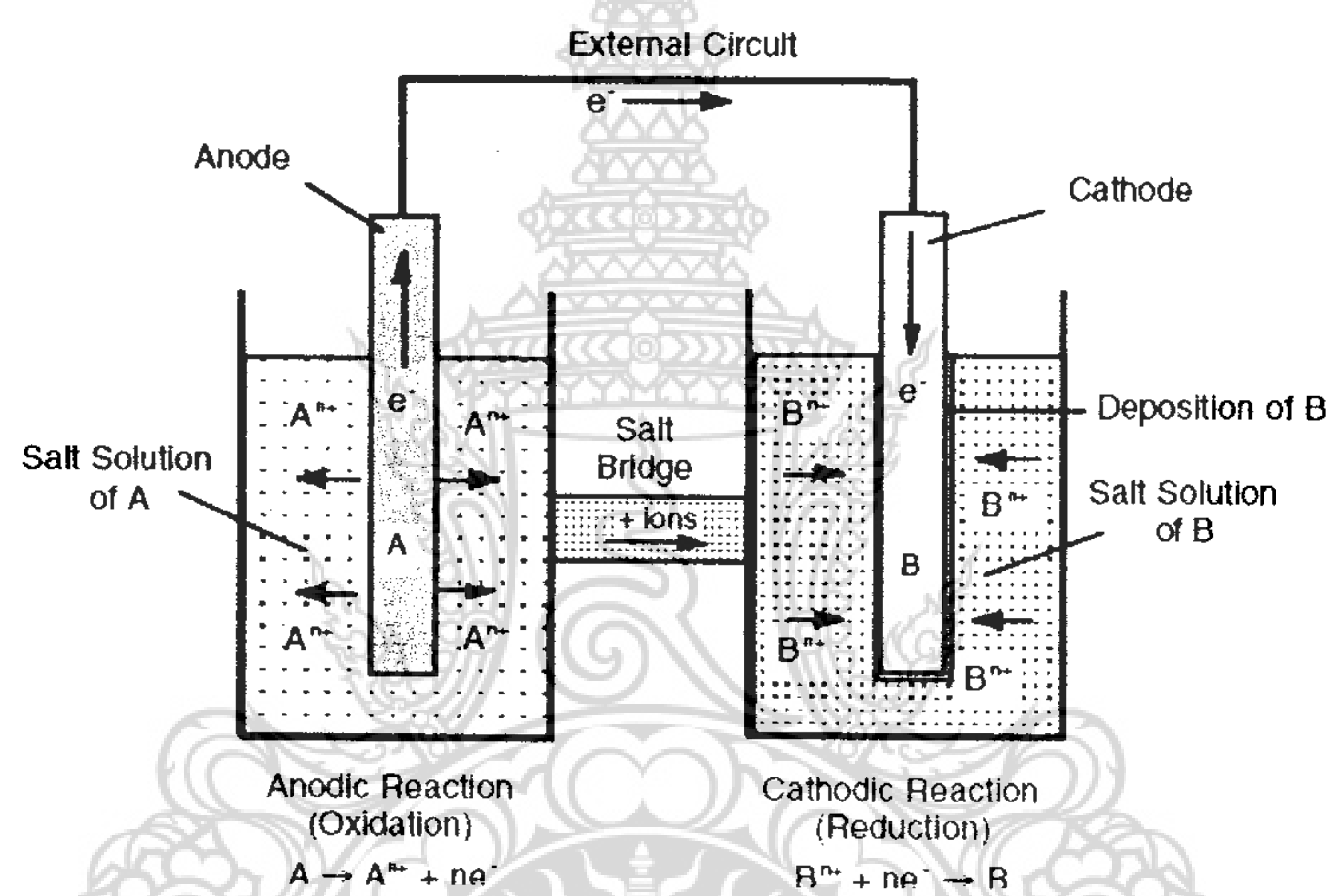
2.2 หลักการของการเกิดสนิม

ขบวนการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของเซลล์ (Electrolytic Cell) ในการเกิดสนิมเป็นขบวนการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้า-เคมี ที่มีความยุ่งยากซับซ้อนเนื่องจากเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตมีการสูญเสียอิเล็กตรอนซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าทั้งระบบของคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในระบบของการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันซึ่งจะต้องมีความเข้าใจถึงกลไกของการกัดกร่อนสามารถอธิบายได้จากขบวนการของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ เซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) และเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic Cell) โดยที่เซลล์ไฟฟ้าเคมีเมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ในขณะที่เซลล์อิเล็กโทรไลต์เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ต้องผ่านกระแสไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไปจึงจะเกิดปฏิกิริยาเคมี และจากรูปที่ 1 แสดงแผนภูมิการ



เกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในเซลล์กัลวานิก โดยที่โลหะที่เกิดการกัดกร่อนเป็นขบวนการที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (การรับและเสียอิเล็กตรอน) เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านสื่อตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกและการเคลื่อนที่ของไอออนที่อยู่ภายใน โดยมีสารละลายเป็นตัวนำ โดยแนวคิดพื้นฐานนี้เป็นที่นิยมใช้กันและจะต้องเข้าใจถึงกลไกของการกัดกร่อนเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาสื่อตัวนำทางไฟฟ้าในระบบของเซลล์กัลวานิก ในระบบนี้จะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ชนิด เมื่อพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาเคมีโดยที่ขั้ว anode ของโลหะ A จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำหน้าที่เป็นขั้วลบสูญเสียอิเล็กตรอน (e^-) กลายเป็นไอออน (A^{n+}) อยู่ในสารละลายซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันเสมอและอิเล็กตรอน (e^-) ที่สูญเสียไปจะเคลื่อนที่ผ่านตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกไปยังขั้ว cathode เป็นขั้วไฟฟ้าที่รับอิเล็กตรอนเรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยารีดักชัน



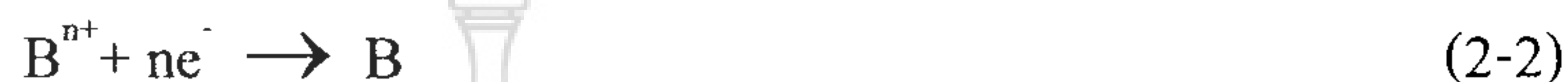
ภาพที่ 2-1 แผนภาพที่แสดงระบบของเซลล์กัลวานิก; การเกิดปฏิกิริยา Oxidation ที่ขั้ว anode และการเกิดปฏิกิริยา Reduction ที่ขั้ว cathode
ที่มา : Brown, T.L. and LeMay, H.E. Jr., (1988)

จากภาพที่ 2-1 แสดงแผนภูมิที่มีส่วนประกอบพื้นฐานของระบบเซลล์กัลวานิก โดยที่ในสารละลาย A จะมีไอออน (A^{n+}) ที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากโลหะ A สูญเสียอิเล็กตรอนและกลายเป็นไอออน (A^{n+}) ออกมาทำให้ประจุสุทธิของสารละลายมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น

การเชื่อมโยงของสารละลาย A และ B โดยสะพานไอออน (Salt bridge) ซึ่งมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ บรรจุอยู่และจะเกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างโลหะทั้งสองที่แช่อยู่ในสารละลายทิศทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Anode) ไปยังขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (cathode) เมื่อโลหะ A ที่แช่ในสารละลาย A เริ่มสึกกร่อน เนื่องจากโลหะ A สูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นไอออนบวก (A^{n+}) อยู่ในสารละลาย เขียน



สมการปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ดังสมการที่ 1 ในขณะที่ขั้วไฟฟ้า cathode มีไอออน (B^{n+}) อยู่ในสารละลาย B จะถูกใช้ไปพร้อมกับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากขั้วไฟฟ้า anode และกลายเป็นอะตอมเกาะติดอยู่ที่โลหะ B จนกระทั่งไอออนบวก (B^{n+}) ในสารละลาย B ลดลง สมการปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเขียนได้ดังสมการที่ 2



โดยที่

A และ B แทนด้วยอะตอมของโลหะ A และ B

A^{n+} และ B^{n+} แทนด้วยไอออนบวกของโลหะ A และ B

ne^- แสดงถึงจำนวนการสูญเสียอิเล็กตรอนของโลหะ A

สะพานไอออน (Salt bridge) ทำหน้าที่รักษาการสมดุลระหว่างไอออนบวกและไอออนลบในแต่ละครึ่งเซลล์ให้คงที่ เนื่องจากโลหะ A สูญเสียอิเล็กตรอนและกลายเป็นไอออน (A^{n+}) ออกมาอยู่ในสารละลาย A ทำให้ไอออน (A^{n+}) ในสารละลายมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ไอออน (B^{n+}) ในสารละลาย B ถูกใช้ไปพร้อมกับอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้า cathode มีค่าเป็นลบและกลายเป็นอะตอมเกาะติดกับโลหะ B ส่งผลทำให้ไอออนบวก (B^{n+}) ในสารละลาย B ลดลงและเหลือไอออนบวก (B^{n+}) น้อยกว่าที่มีอยู่ในสารละลาย B ผลก็คือทำให้ประจุสุทธิในสารละลาย B เป็นลบหรือมีค่าเป็นบวกลดลง ดังนั้นเพื่อให้เกิดการสมดุล สารละลายโปรตัสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่อยู่ในสะพานไอออน (Salt bridge) จะเกิดการแตกตัวจะส่งให้ไอออนลบ (Cl^-) ลงไปในสารละลาย A ซึ่งเป็นด้านที่มีไอออนบวกเพิ่มขึ้นในขณะเดียวกันไอออนบวก (B^{n+}) ในสารละลาย B ถูกใช้ไปจนทำให้ไอออนบวกลดลง สะพานไอออนก็จะทำหน้าที่ส่งไอออนบวก (K^+) ลงมาในสารละลาย B ทำให้มีปริมาณไอออนบวกในสารละลาย A และ B สมดุลกันผลก็คือปริมาณไอออนสุทธิในสารละลายทั้งสองจะคงที่ พิจารณาได้จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้สามารถแยกออกมาเป็นครึ่งปฏิกิริยาดังนี้

ผลของทั้งสองปฏิกิริยาที่มีไอออนบวกเพิ่มขึ้นในสารละลาย A ที่ขั้วไฟฟ้า anode ในขณะที่ไอออนบวกถูกใช้หมดไปในสารละลาย B ที่ขั้วไฟฟ้า Cathode ปฏิกิริยาครึ่งเซลล์ยังคงทำหน้าที่เชื่อมต่ออยู่ระหว่างสองสารละลายเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร แต่ถ้าสื่อที่เป็นตัวนำไม่สามารถเชื่อมต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าก็จะไม่เกิดการกัดกร่อนขึ้นที่ขั้ว Cathode และก็จะไม่มีอะตอมสะสมอยู่ที่ ขั้ว Cathode ก็จะไม่มีเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อน



2.3 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากปฏิกิริยาไฟฟ้าในลักษณะศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (half-cell Potentials) ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไม่สามารถที่ที่จะวัดค่าได้ด้วยขั้วไฟฟ้าเดี่ยว ดังนั้นหากนำเอาครึ่งเซลล์ต่างชนิดมาต่อกันให้เป็นวงจรผลของศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของครึ่งเซลล์ที่นำมาต่อกันซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกมีหน่วยในการวัดค่าเป็นโวลต์ ทั้งนี้หากนำศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไฮโดรเจนมาตรฐานไปเปรียบเทียบกับครึ่งเซลล์ชนิดใดชนิดหนึ่งโดยนำไปต่อเป็นเซลล์ไฟฟ้าคู่กับครึ่งเซลล์ไฮโดรเจนมาตรฐานค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่วัดได้จะเป็นศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานครึ่งเซลล์นั้น ศักย์ไฟฟ้าเหล่านี้มีผลต่อการกัดกร่อนที่ขั้วไฟฟ้า anode เมื่อมีกระแสไฟฟ้าจากภายนอกครบวงจร โดยปรกติศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จะแสดงในรูปของปฏิกิริยา Oxidation ซึ่งเกิดจากอะตอมของโลหะเกิดการแตกตัวปล่อยอิเล็กตรอนและไอออนบวกออกมาพร้อมกัน โดยที่ผลกระทบของค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนบวกในสารละลายที่มีขั้วไฟฟ้าแช่อยู่และอุณหภูมิของสารละลาย ดังนั้นค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานเป็นการวัดความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิมาตรฐาน และสำหรับค่าที่วัดได้จะมีค่าที่เป็นลบมากกว่าซึ่งจะชี้ให้เห็นถึงแนวโน้มของการสูญเสียอิเล็กตรอนและส่งผลการกัดกร่อนของโลหะ

สมมุติให้วงจรไฟฟ้าภายนอกจากภาพที่ 2-1 แทนด้วยโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานไฟฟ้าที่มีความละเอียดสูงซึ่งไม่มีกระแสไฟฟ้าจากภายนอกผ่านเข้ามาในวงจรเป็นเงื่อนไขของสภาวะที่เรียกว่า (Open-circuit Potential) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์เป็นค่าของศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วไฟฟ้าที่มีความแตกต่างกันระหว่างปฏิกิริยา anodic และปฏิกิริยา Cathodic (Brown, T.L. and LeMay, H.E., Jr., 1988)

จากตัวอย่างลักษณะนี้ตามภาพที่ 2-1 ถ้าสมมุติให้ขั้วไฟฟ้าอันหนึ่งเป็นเหล็กแช่ในสารละลายที่มีไอออนของเหล็กและอีกขั้วไฟฟ้าเป็นสังกะสีแช่ในสารละลายซึ่งมีซิงค์ไอออนละลายอยู่จะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานสำหรับปฏิกิริยา Oxidation ของเหล็กอ่านได้ -0.44 โวลต์ และค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานสำหรับปฏิกิริยา Oxidation ของสังกะสีอ่านได้ -0.76 โวลต์ (Fontana, M.G., 1986) ศักย์ไฟฟ้าของสังกะสีจะมีค่าเป็นลบมากกว่าเหล็ก เพราะว่าแนวโน้มการสูญเสียอิเล็กตรอน

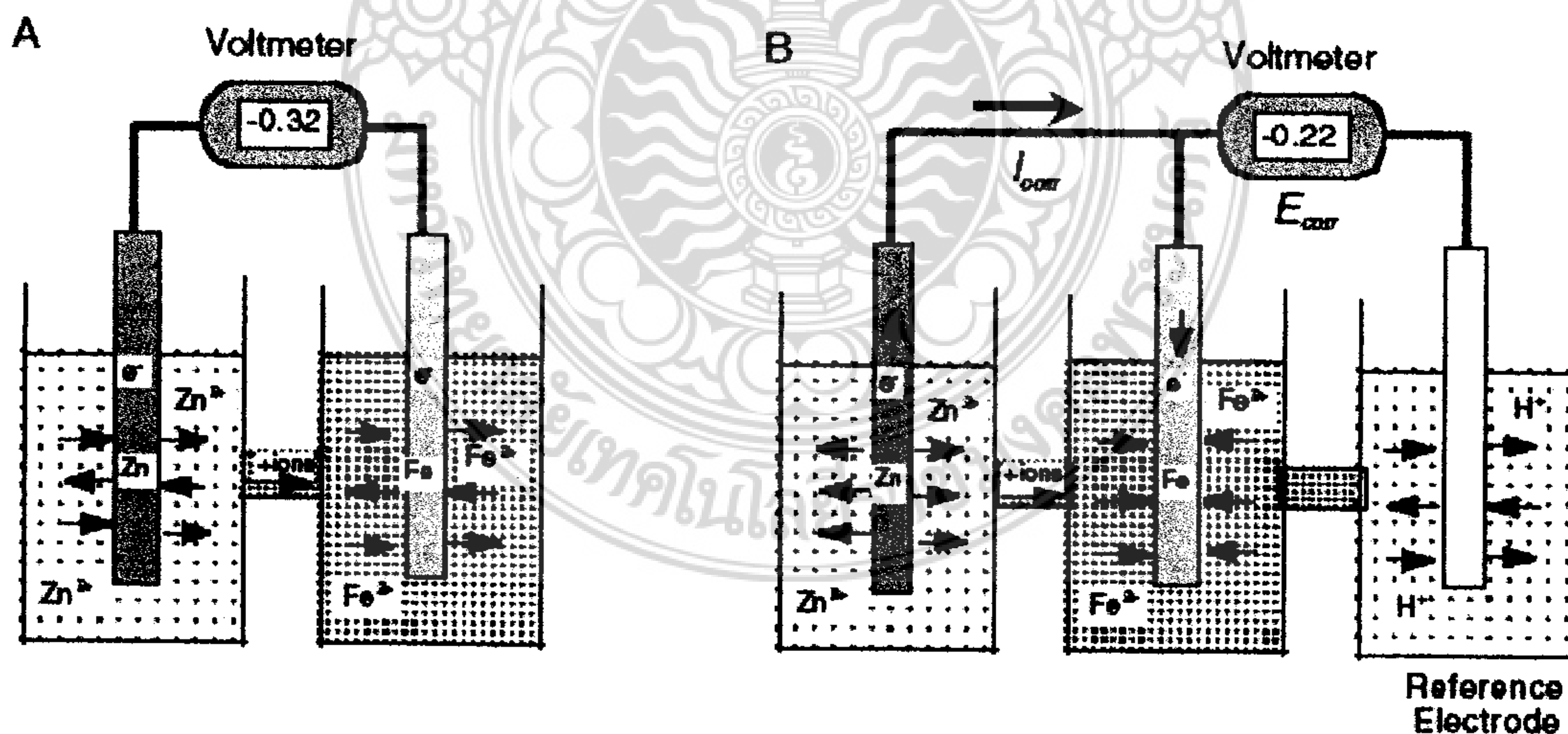
ของสังกะสีมีมากกว่าเหล็ก และถ้าปลายด้านบวกของโวลต์มิเตอร์มีการเชื่อมต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าสังกะสี ค่าของศักย์ไฟฟ้าอ่านได้ -0.32 โวลต์ และถ้าปลายด้านบวกของโวลต์มิเตอร์เชื่อมต่อเข้ากับขั้ว cathode ค่าศักย์ไฟฟ้าอ่านได้ +0.32 โวลต์ ดังนั้นขั้วไฟฟ้าสังกะสีจะเป็นขั้ว anode และขั้วไฟฟ้าของเหล็กจะเป็นขั้ว cathode แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนของอิเล็กตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าสังกะสี (anode) ผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกไปยังขั้วไฟฟ้าของเหล็ก (cathode)



ซึ่งสวนทางกับการไหลของกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ ดังนั้นสังกะสีจึงเป็นขั้วลบ และเหล็กเป็นขั้วบวกหรือกล่าวได้ว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าไปยังขั้วที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าสรุปได้ว่าครึ่งเซลล์ที่รับอิเล็กตรอน (cathode) มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าครึ่งเซลล์ที่ให้อิเล็กตรอน (anode)

2.4 หลักการโพลาไรซ์ขั้น

เมื่อตัวนำไฟฟ้ามีกระแสไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกวงจร ทำให้สามารถหาค่าอัตราการเกิดสนิมของขั้วไฟฟ้า anode ได้และจากรูปที่ 2-2 (A) แสดงถึงเซลล์ตัวนำไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้าและโวลต์มิเตอร์ที่มีความละเอียดสูงค่าศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์ได้มาจากศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาซึ่งเป็นความต่างศักย์ของวงจรไฟฟ้าแบบเปิด (Open-circuit Potential) (Fontana, M.G.,1986) การวัดค่าความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าโดยมีขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2-2 (B) ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าอยู่ระหว่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของขั้วไฟฟ้า ซึ่งที่ขั้วไฟฟ้า แอโนดจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกมากกว่าและที่ขั้วไฟฟ้า แคโทดจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบมากกว่าซึ่งมีผลทำให้กระแสไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงความสมดุลของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแต่ละขั้วไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้านี้เรียกว่าโพลาไรซ์ Polarization (Fontana, M. G., 1986 and ASTM G15, 2002., et al.) ความแตกต่างระหว่างความสมดุลของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และศักย์ของขั้วไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าเป็น Over potential



ภาพที่ 2-2 เซลล์ตัวนำไฟฟ้า: (A) ศักย์ไฟฟ้าที่สมดุลซึ่งอ่านค่าได้จากโวลต์มิเตอร์

(B) วงจรไฟฟ้า Short-Circuit cell กับขั้วไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้า

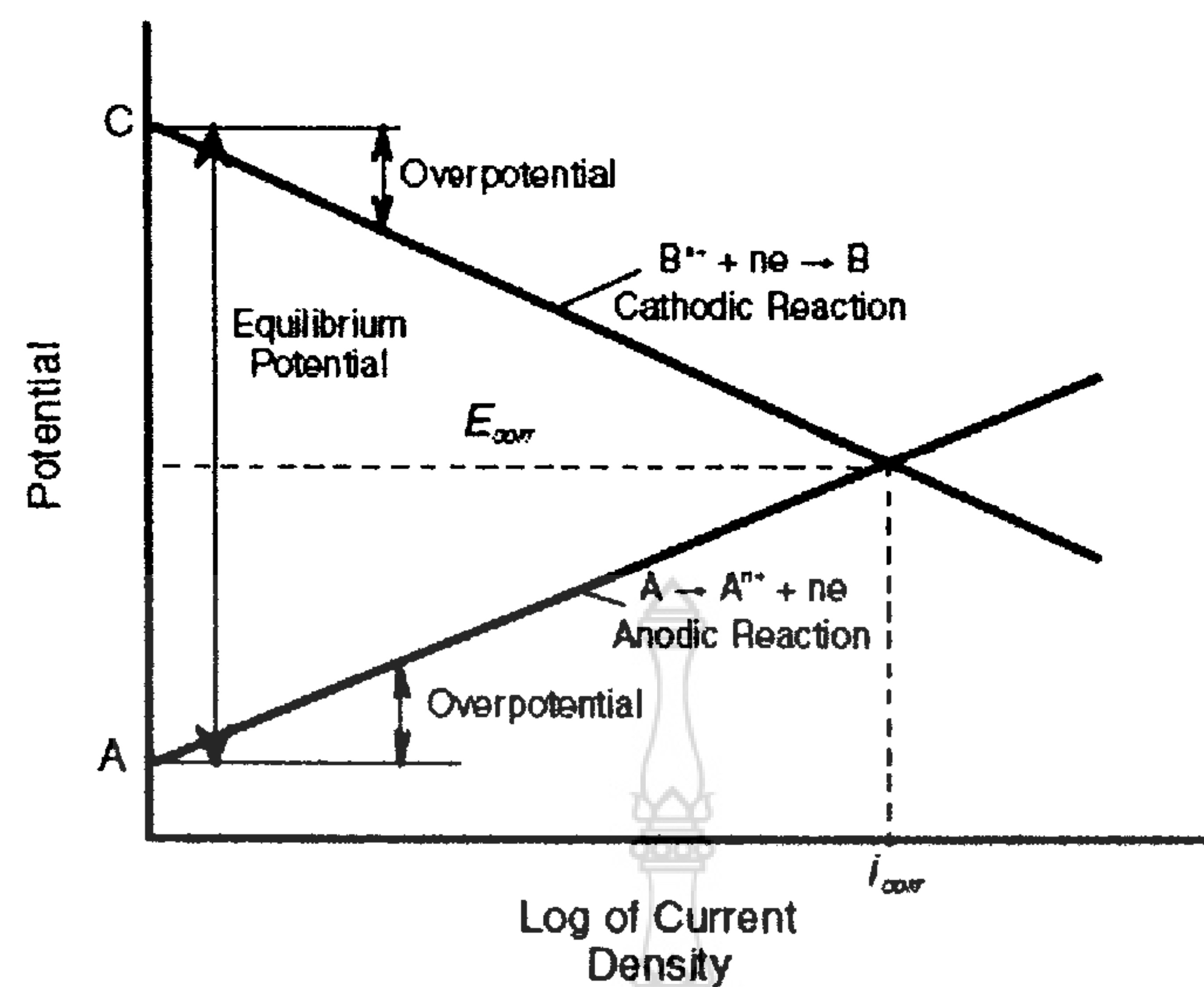
ที่มา : Nicholas J.Carino, 2004



ในทุกๆกระบวนการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จะมีคุณลักษณะเฉพาะเป็นกราฟเส้นโพลาไรซ์ (Polarization Curve) ซึ่งแทนด้วยความสัมพันธ์ระหว่าง Overpotential และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกและไหลเข้าที่ขั้วไฟฟ้าดังรูปที่ 3 แสดงให้เห็นแนวคิดที่เข้าใจได้ง่ายของ Polarization Curve สำหรับเซลล์ตัวนำไฟฟ้าที่มีขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทด (Rosenberg, A., Hansson, C., Andrade, C., et al., 1989) จากภาพที่ 2-3 แสดงแกนแนวนอนเป็น Log scale มีความสัมพันธ์เป็นแบบไม่เชิงเส้นตรง (Nonlinear) ในเทอมของกระแสไฟฟ้าที่แท้จริง นอกจากนี้โดยปกติกระแสไฟฟ้าจะแสดงอยู่ในรูปของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current density) ซึ่งมีหน่วยเป็นกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าโดยที่จุด A และ C มีความสอดคล้องด้วยเงื่อนไขของความสมดุลของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์โดยไม่มีกระแสไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและความแตกต่างระหว่างค่าของความต่างศักย์เป็นความสมดุลของศักย์ไฟฟ้า (equilibrium potential) ของเซลล์ตัวนำไฟฟ้าและกราฟเส้นทั้งคู่นี้แสดงให้เห็นถึงกระแสไฟฟ้าที่ออกจากขั้วไฟฟ้าแอโนดให้ค่าของความต่างศักย์เพิ่มขึ้นทำให้มีค่าเป็นบวกและในขณะที่กระแสไฟฟ้าที่รับเข้ามาในขั้วไฟฟ้าแคโทดให้ค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นเช่นกันแต่จะให้ค่าเป็นลบ กราฟเส้นโพลาไรซ์นี้เป็นกราฟที่ยอมรับได้ซึ่งสามารถที่จะนำไปหาค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (Corrosion Current Density) และศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (Corrosion Potential) ของเซลล์ตัวนำไฟฟ้าโดยเงื่อนไขของเซลล์วงจรไฟฟ้านี้ ต้องมีความเสถียรเพียงพอและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากขั้วไฟฟ้าแอโนดมีค่าเท่ากับกับกระแสไฟฟ้าที่รับเข้าไปในขั้วไฟฟ้าแคโทด ดังนั้นตำแหน่งของจุดตัดกันของเส้นโค้งโพลาไรซ์เชิงเส้นถูกกำหนดให้เป็นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (Corrosion Current Density, i_{corr}) และศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (Corrosion Potential, E_{corr}) ของเซลล์ตัวนำไฟฟ้า

จากรูปที่ 2-3 แสดงถึงเส้นกราฟทั้งสองมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากันด้วยเงื่อนไขของความสมดุลของครึ่งเซลล์ (ที่จุด A และ C) ซึ่งในความเป็นจริงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่จุด A และ C แสดงให้เห็นว่ากระแสไฟฟ้าทำให้ความสมดุลเกิดการเปลี่ยนแปลงในครึ่งเซลล์ไฟฟ้าและความสมดุลไม่จำเป็นที่จะต้องมีความเท่ากัน (Fontana., M.G., 1986)





รูปที่ 2-3 กราฟเส้นโพลาไรซ์สำหรับ Short-Circuited Electrolytic Cell แสดงถึงความเสถียรของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม
ที่มา : (Rosenberg et al., 1989)

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมสามารถที่จะคำนวณย้อนกลับไปหาค่าของการสูญเสียของ Electrode ในเทอมของมวลหรือความหนาต่อหน่วยของเวลาโดยใช้กฎของ Faraday's Law (Evans, U.R.,1980.,ASTM G102,2002., Andrade, C. and Alonso, C.,1996)

2.5 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (Corrosion of Steel in Concrete)

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีประกอบด้วยปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic Reaction) และปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic Reaction) กระบวนการเกิดสนิมเริ่มจากการมีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้อะตอมของเหล็กสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นไอออน (Fe^{2+}) ดังสมการที่ (2-3) ละลายอยู่ในสารละลาย Electrolyte รอบๆเหล็กเสริมเรียกบริเวณนี้เป็นแอโนดและอิเล็กตรอนนี้ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้า ในขณะที่บริเวณเหล็กเสริมที่ไม่มีการแตกตัวของอิเล็กตรอนและไอออนบริเวณนั้นจะมีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด อธิบายได้ดังรูปที่ 4 แสดงถึงกระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังภาพที่ 4(A) อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่แอโนดซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าที่สูงจะเคลื่อนที่ไปตามเหล็กเสริมซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าและเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าซึ่งเป็นแคโทดและทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) และออกซิเจน (O_2) ที่อยู่บริเวณนี้เกิดเป็นไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ขึ้นดังสมการที่ 4 และหลังจากนั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นทั้งภายในและภายนอกเหล็กเสริม สำหรับกระแสภายในเหล็กเสริมเป็นการเคลื่อนที่ของ



อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่จากแอโนดไปสู่แคโทด ในขณะที่กระแสภายนอกเหล็กเสริมเป็นการเคลื่อนที่ของ (Fe^{2+}) และ (OH^-) ผ่านสารละลายในช่องว่าง (Pore Solution) ของคอนกรีตรอบๆ เหล็กเสริม โดยประจุลบคือ (OH^-) จะเคลื่อนที่จากขั้วแคโทดไปสู่แอโนดและประจุบวก (Fe^{2+}) จะเคลื่อนที่จากแอโนดไปสู่แคโทด ดังภาพที่ 4(B) การเคลื่อนที่ของไอออนโดยผ่านสารละลายในช่องว่างของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่สำคัญของการเกิดการกัดกร่อน สารละลายในช่องว่างส่วนใหญ่เป็นสารละลายของ Alkali และ Calcium Hydroxide เปรียบเหมือนเป็นสารละลาย Electrolyte ทำให้เกิดการครบวงจรของกัลวีวานิกเซลล์และเกิดการกัดกร่อนขึ้น (Bentur et al., 1997) แต่ถ้าน้ำในช่องว่างนี้แห้งหรือโครงสร้างภายในของคอนกรีตที่บีบแน่นและช่องว่างภายในเกิดขึ้นไม่ต่อเนื่องการไหลของไอออนผ่านสารละลายในช่องว่างจะเกิดขึ้นได้ยากขึ้นซึ่งทำให้การเกิดการกัดกร่อนช้าลงจนหยุดการกัดกร่อน

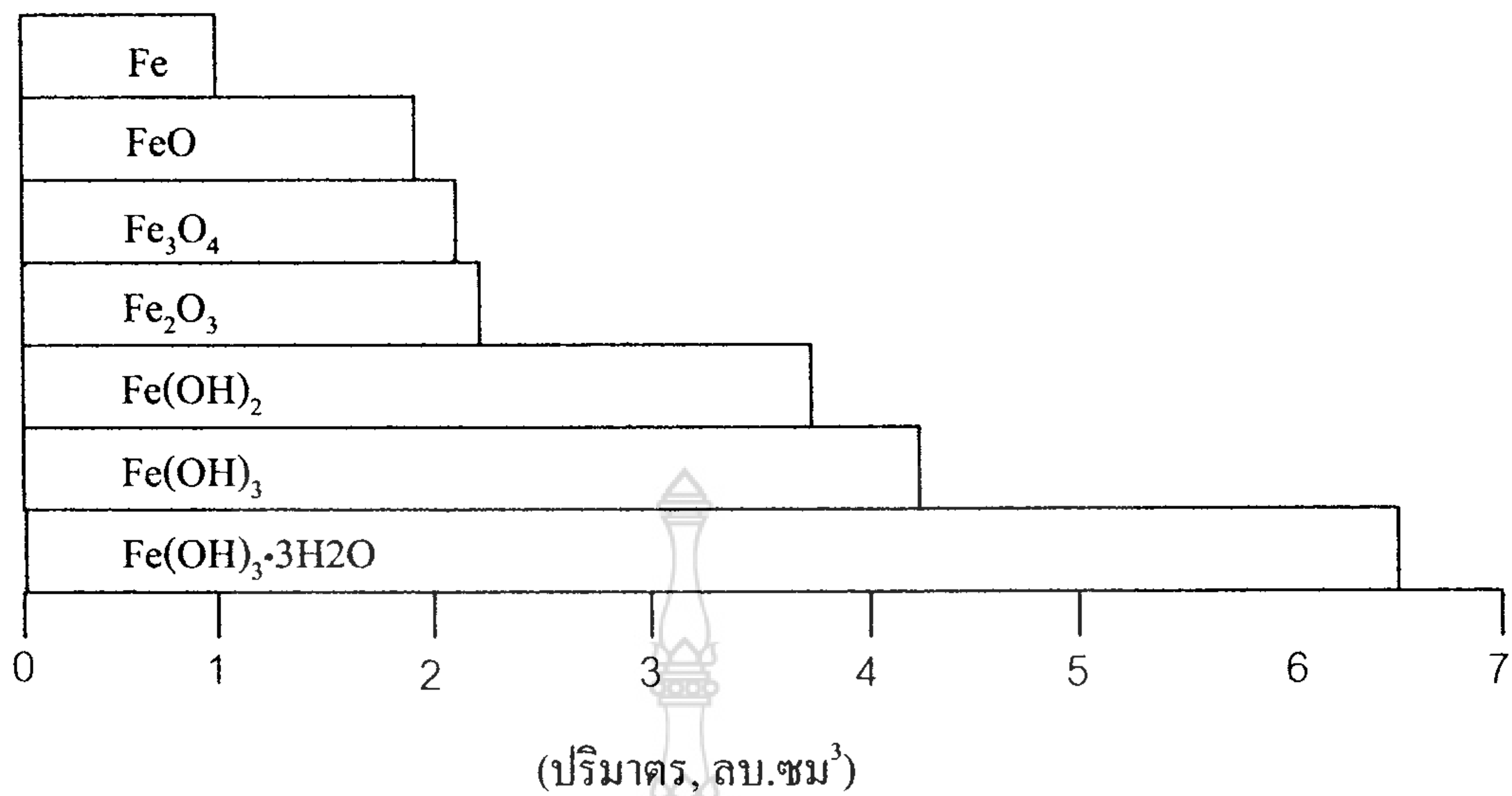


จากการเคลื่อนที่ของ Fe^{2+} และ OH^- จากแอโนดและแคโทดตามลำดับ โดยที่ OH^- จากแคโทดเคลื่อนที่ไปรวมตัวกับ Fe^{2+} และทำปฏิกิริยาเกิดเป็น $Fe(OH)_2$ (ferrous hydroxide) ดังสมการที่ 5 ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ O_2 ต่อได้และเกิดเป็นสนิมเหล็ก $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ (hydrate ferric oxide) หรือ red-brown rust และ Fe_3O_4 (black magnetite) ซึ่งเกิดจาก $Fe_3O_4 \cdot H_2O$ (Green hydrate magnetite) ดังสมการที่ 6, 7 และ 8



ซึ่งผลิตภัณฑ์สนิมเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของการกัดกร่อนคือสนิมในรูปแบบต่างๆ มีปริมาณมากกว่าเหล็กก่อนเกิดปฏิกิริยา 4 ถึง 6 เท่า (Nielsen., A, 1985) ดังแสดงในภาพที่ 2-5 ทำให้เกิดแรงดันภายในและคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ นอกจากนี้ในส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบางจุดเหล็กเสริมมีพื้นที่หน้าตัดลดลงส่งผลต่อการรับแรงของโครงสร้างซึ่งถ้าหากไม่ได้ซ่อมแซมให้ถูกต้องตามวิธี โครงสร้างอาจเกิดการวิบัติได้





ภาพที่ 2-5 ปริมาณของเหล็กเสริมที่เกิดสนิม

ที่มา : Nielsen A., (1985)

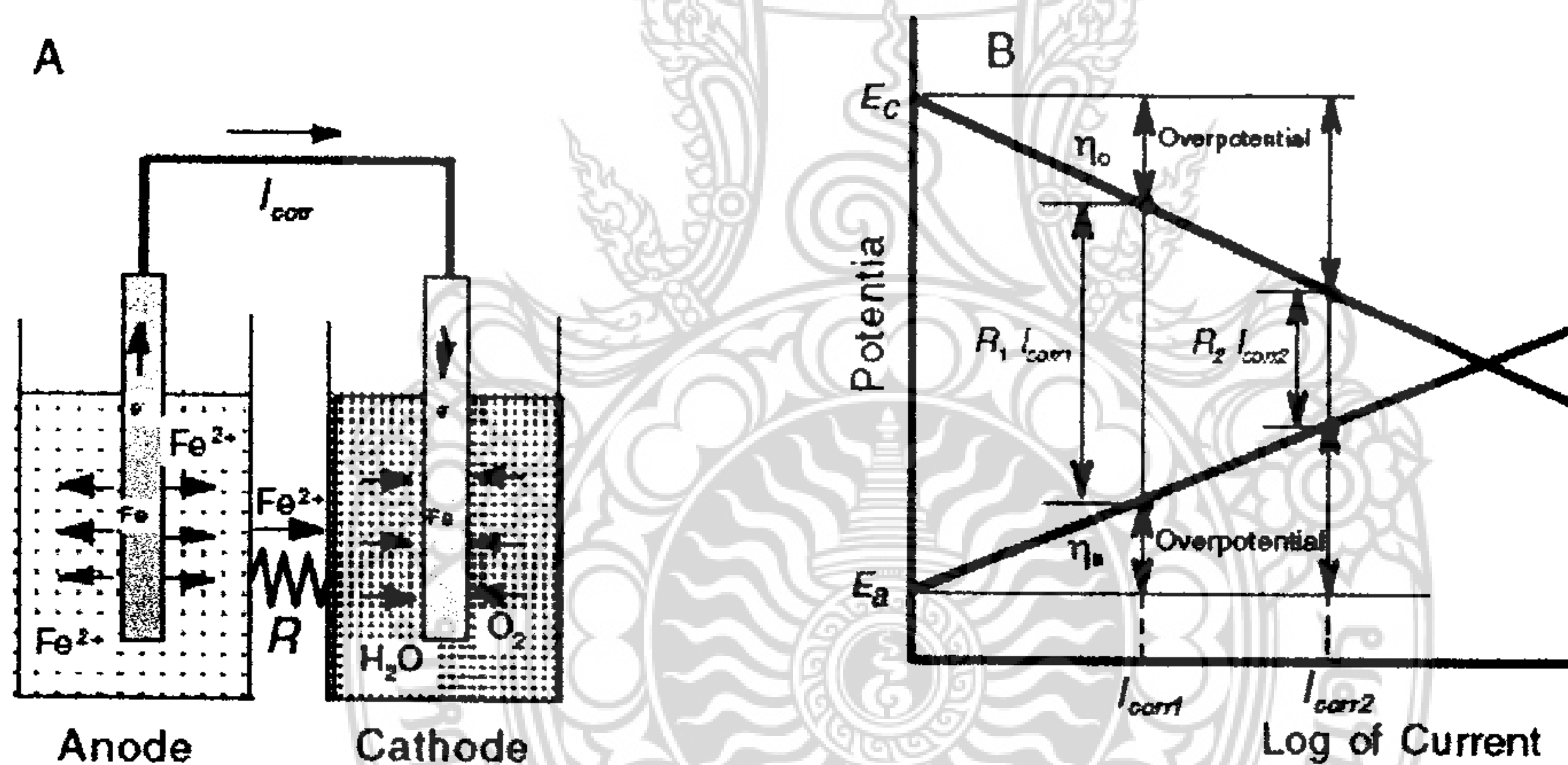
จากรายละเอียดข้างต้นที่ได้อธิบายถึงกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กเสริมซึ่งโดยทั่วไปแล้วการกัดกร่อนของเหล็กเสริมสามารถเกิดขึ้นเองได้ในธรรมชาติและเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาในบริเวณที่มีความชื้นแต่สำหรับเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตนั้น จะอยู่ในสถานะที่ไม่เกิดสนิมเนื่องจากมี Passivation film ที่อยู่โดยรอบเหล็กเสริมในคอนกรีตซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ และในช่วงที่คอนกรีตมีการพัฒนากำลัง คอนกรีตจะมีความเป็นด่างสูงมีค่า PH ประมาณ 13 ซึ่งสามารถช่วยป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ (Bentur et al., 1997) เนื่องจากในสถานะของการเป็นด่างสูงเหล็กจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาอะโนดิกได้ นั่นคือเหล็กจะไม่แตกตัวเป็นไอออนทำให้ปฏิกิริยาการเกิดสนิมไม่สามารถเกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปนั้นมักอยู่ในสภาพแวดล้อมที่อาจสัมผัสกับสารเคมี กรด หรือในสภาพสิ่งแวดล้อมที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมเช่น โครงสร้างที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเล จะเกิดผลกระทบเนื่องจากคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นจะเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นด่างของคอนกรีตทำให้ค่า PH ลดลงมีค่าน้อยกว่า 13 จึงเป็นเหตุผลทำให้เร่งการเกิดสนิมได้เร็วขึ้น จากเซลล์ตัวนำทางไฟฟ้าแบบ Short-Circuited Electrolytic Cell ดังภาพที่ 2-2 แสดงถึงการไหลของไอออนในสารละลายระหว่างเซลล์ตัวนำไฟฟ้าโดยมีสะพานเกลือเป็นตัวเชื่อมทำหน้าที่ช่วยรักษาความสมดุลของเซลล์ตัวนำไฟฟ้าให้มีความเสถียรภาพ ในกรณีของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตโดยที่คอนกรีตทำหน้าที่เป็นสื่อตัวนำทางไฟฟ้าของไอออนระหว่างแอโนดและแคโทดซึ่งทำหน้าที่เหมือนสะพานให้ไอออนสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ระหว่างครึ่งเซลล์ สำหรับในโพรงเล็กๆของโครงสร้าง (Pore Structure) ของเพสต์ (paste) มีสารละลายอยู่ภายในซึ่งโพรงเล็กๆนั้นจะอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยสารละลายจะเป็น



ตัวนำไอออนให้เคลื่อนที่ได้ง่ายโดยทั่วไปในคอนกรีต การเคลื่อนที่ของไอออนถูกควบคุมด้วยสื่อตัวนำทางไฟฟ้าของ paste ในภาพที่ 6 (a) แสดงถึงสื่อตัวนำไฟฟ้าของสะพานที่เชื่อมต่อเนื่องกันระหว่างสารละลายซึ่งแทนด้วยอุปกรณ์ต้านทานกระแสไฟฟ้าในวงจร(R)ทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดการไหลของไอออนระหว่างครึ่งเซลล์และช่วยลดค่าของกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม โดยเปรียบเทียบกับสื่อตัวนำไฟฟ้างดภาพที่ 2(b) กราฟเส้นโพลาริซ์ในภาพที่ 6(b) ได้อธิบายถึงการลดลงของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม เนื่องจากแรงดันไฟฟ้ามีความแตกต่างกันระหว่าง ครึ่งเซลล์ของศักย์ไฟฟ้าที่สมดุล equilibrium potential ของขั้วแคโทดและแอโนด ($E_c - E_a$) เป็นการทำให้แรงดันไฟฟ้าหมดไปที่ขั้ว electrode และความต้านทานของตัวนำไฟฟ้าของคอนกรีตจะลดลง (West., J.M., 1986)

$$E_c - E_a = \eta_a + |\eta_c| + I_{corr}R \quad (9)$$

โดยที่ η_a และ η_c เป็น Overpotentials ของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง, $|\eta_c|$ มีค่าเป็นบวกเสมอ, R เป็นความต้านทานของสื่อตัวนำไฟฟ้าและ I_{corr} เป็นกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมแท้จริง ซึ่งกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมมีค่าต่ำกว่าซึ่งค่าความต้านทานจะเท่ากับศูนย์ ดังภาพที่ 2 และ 3



ภาพที่ 2-6 (A) เซลล์ตัวนำไฟฟ้าที่ทำให้เหล็กเกิดสนิมในคอนกรีต; (B) เส้นกราฟโพลาริซ์แสดงถึงผลกระทบของความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีต;

ที่มา : Wwst, J.M., 1986

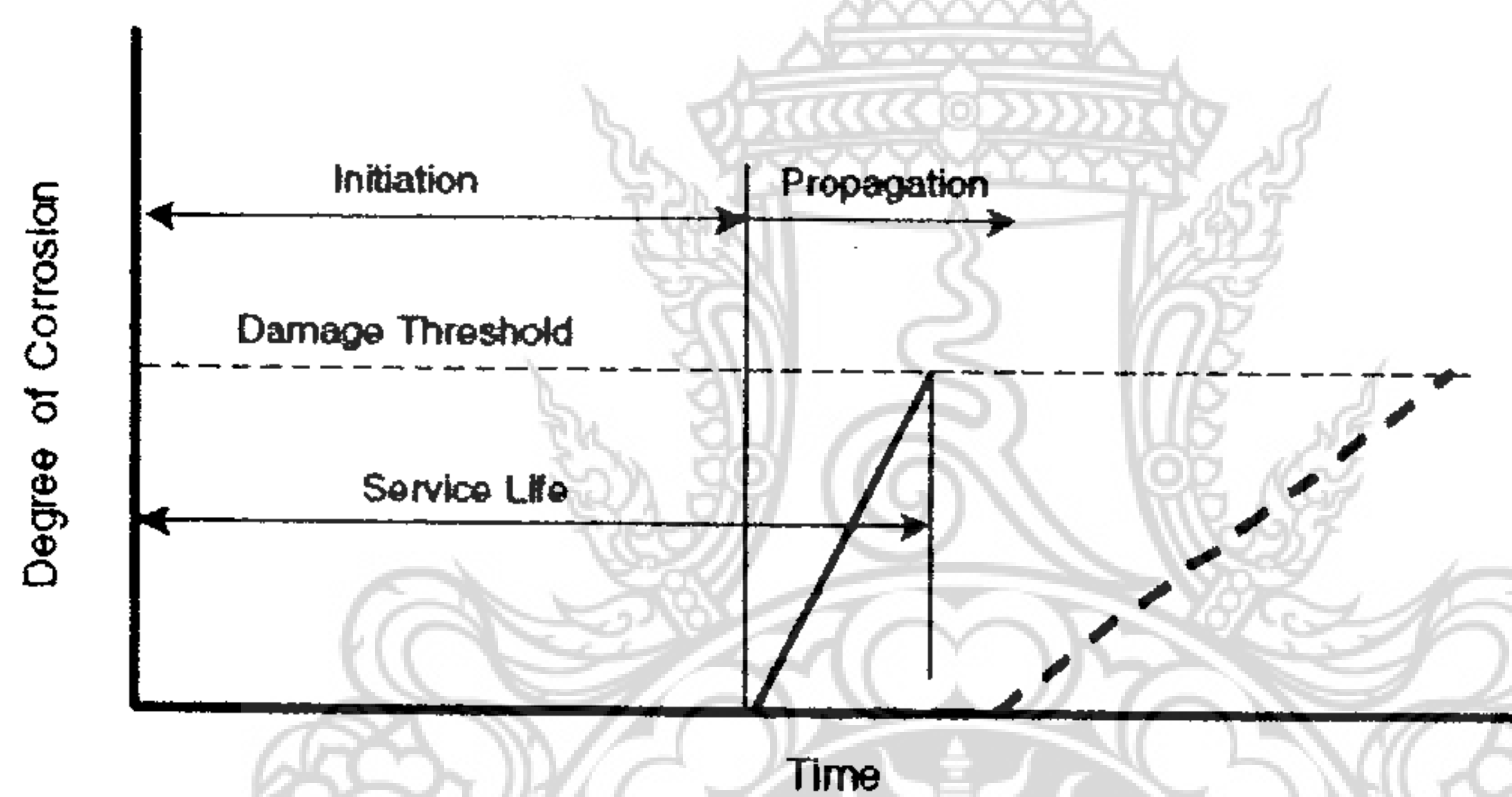
จากภาพที่ 6(B) แสดงถึงวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของเหล็กเสริมที่เป็นสนิม (Wwst, J.M., 1986) ขั้วไฟฟ้าที่มีสถานะตรงกันข้าม (Polarized electrode) แสดงเป็นอุปกรณ์ต้านทานทางไฟฟ้าโดยปกติใช้อ้างอิงเป็น 'reaction resistance' (Elsener, B., Muller, S., 1990) ถ้าหากสื่อตัวนำไฟฟ้ามีความต้านทานลดลงจาก R_1 เป็น R_2 ค่าแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าลดลง ในขณะเดียวกันค่า Overpotential และกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมก็จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้ถ้าจำนวนออกซิเจนในคอนกรีตมีค่า



น้อยกว่าความต้องการในการทำปฏิกิริยาที่ชั่วแคโครด เป็นเงื่อนไขที่ทราบกันว่าขั้วไฟฟ้าจะเกิดสถานะที่มีคุณลักษณะที่ขัดแย้งกันและเป็นสาเหตุทำให้กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมมีค่าลดลง (Fontana., M.G., 1986, Uhig, H.H., 1971 and West, J.M.,1986)

2.6 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมเหล็ก

Tutti.,k.,1980 ได้เสนอแนวความคิด โดยการจำลองรูปแบบแทนด้วยอายุการใช้งานของ โครงสร้างคอนกรีตที่มีความไวต่อการเกิดสนิมของเหล็กและจากภาพที่ 2-7 แสดงให้เห็นถึงระดับของการเกิดสนิมเป็นฟังก์ชันกับเวลาซึ่งในช่วงระยะเวลาเริ่มแรกเหล็กเสริมจะยังไม่เกิดสนิมและถ้าคลอไรด์ไอออนหรือเกิดการโบเนชั่นที่ผิวหน้าคอนกรีตและซึมผ่านไปจนถึงเหล็กเสริมและเมื่อเหล็กสูญเสียชั้นฟิล์มบางๆที่ป้องกันที่ผิวเหล็กเสริมจะทำให้เกิดสถานะของการแพร่เริ่มต้นขึ้นและระดับของการเกิดสนิมจะพัฒนาเพิ่มขึ้นในอัตราที่รวดเร็ว

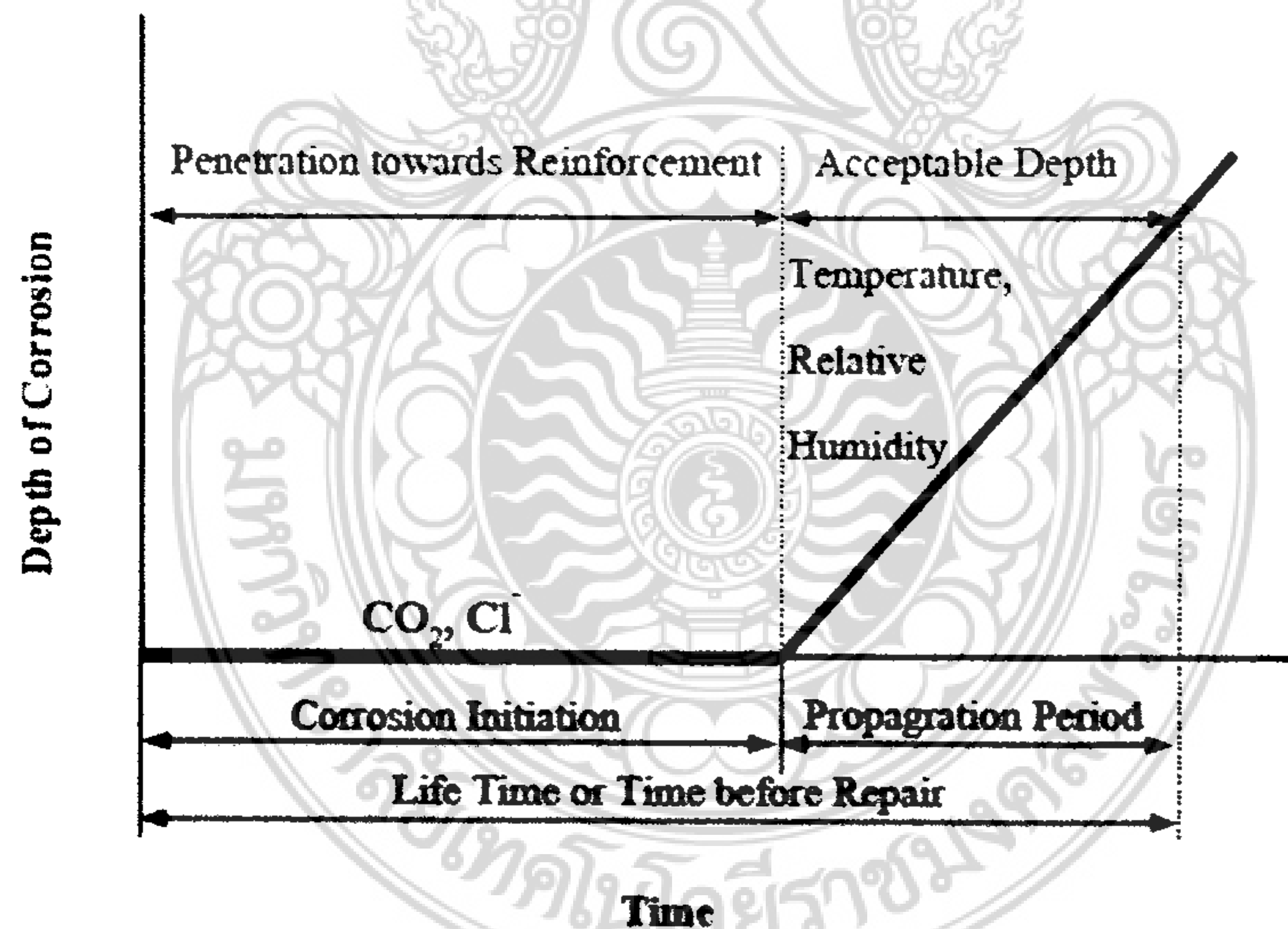


ภาพที่ 2-7 รูปแบบจำลองกระบวนการเกิดสนิมของเสริมเหล็กในคอนกรีต
ที่มา : (Tutti, K., 1980)

อัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมขึ้นอยู่กับสถานะของการแพร่ของคลอไรด์ซึ่งเป็นปัจจัยหลักส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยแทนด้วยระยะเวลา เมื่อระดับความเสี่ยงของการเกิดสนิมสูงขึ้นจนมีผลกระทบต่อกำลังของเหล็กเสริมหรือเป็นเหตุให้อายุการใช้งานของโครงสร้างลดต่ำลงจนกระทั่งถึงระดับวิกฤติ ดังนั้นเส้นประในภาพที่ 2-7 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าเพราะว่าระยะเวลาช่วงเริ่มต้นเป็นช่วงเวลาที่ยาวนานกว่าและอัตราการเกิดสนิมจะลดลงในสถานะที่มีการแพร่ จากรูปแบบจำลองอธิบายได้ว่าระยะหุ้มของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีตมีค่าต่ำจะช่วยยืดเวลาอายุการใช้งานยาวนานขึ้น



Tuutti, k. (1982) ได้นำเสนอรูปแบบจำลองใช้สำหรับทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตามภาพที่ 8 การเกิดสนิมในระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ต้องมีความสัมพันธ์กับรอยแตกร้าวที่ปรากฏให้เห็นซึ่งช่วงเวลาของการเสื่อมสภาพประกอบไปด้วย 2 ช่วงคือช่วงเวลาเริ่มต้นและช่วงเวลาการแพร่โดยที่ความยาวในช่วงเวลาเริ่มต้นเป็นช่วงเวลาโดยประมาณที่ต้องการให้เกิดแทรกซึมของสารละลายเข้าไปถึงผิวของเหล็กเสริมและกระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อน ในขณะที่ช่วงเวลาการแพร่เป็นช่วงเวลาที่มีสนิมมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นจึงเป็นช่วงเวลาของการซ่อมแซมซึ่งกลายมาเป็นเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการซ่อมแซมและรูปแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของโครงสร้างสะพานคอนกรีตในสถานะสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดสนิมเป็นรูปแบบจำลองการเสื่อมสภาพที่พัฒนาโดย Cady and Weyers (Cady,P.D. and Weyers R.E.,1983) การแทรกซึมของคลอไรด์มีอิทธิพลทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้พื้นผิวสะพานคอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพและแบบจำลองที่ใช้ทำนายการเสื่อมสภาพโดยพิจารณาเป็นเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวทั้งหมดที่เกิดการแตกหลุดล่อนแตกออกมาเป็นชั้นๆ และเกิดรอยแตกร้าวหลายๆแนวนำมาวมกันเป็นความเสียหายทั้งหมดเพื่อใช้ในการทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างที่เหลืออยู่สำหรับใช้งานต่อไป

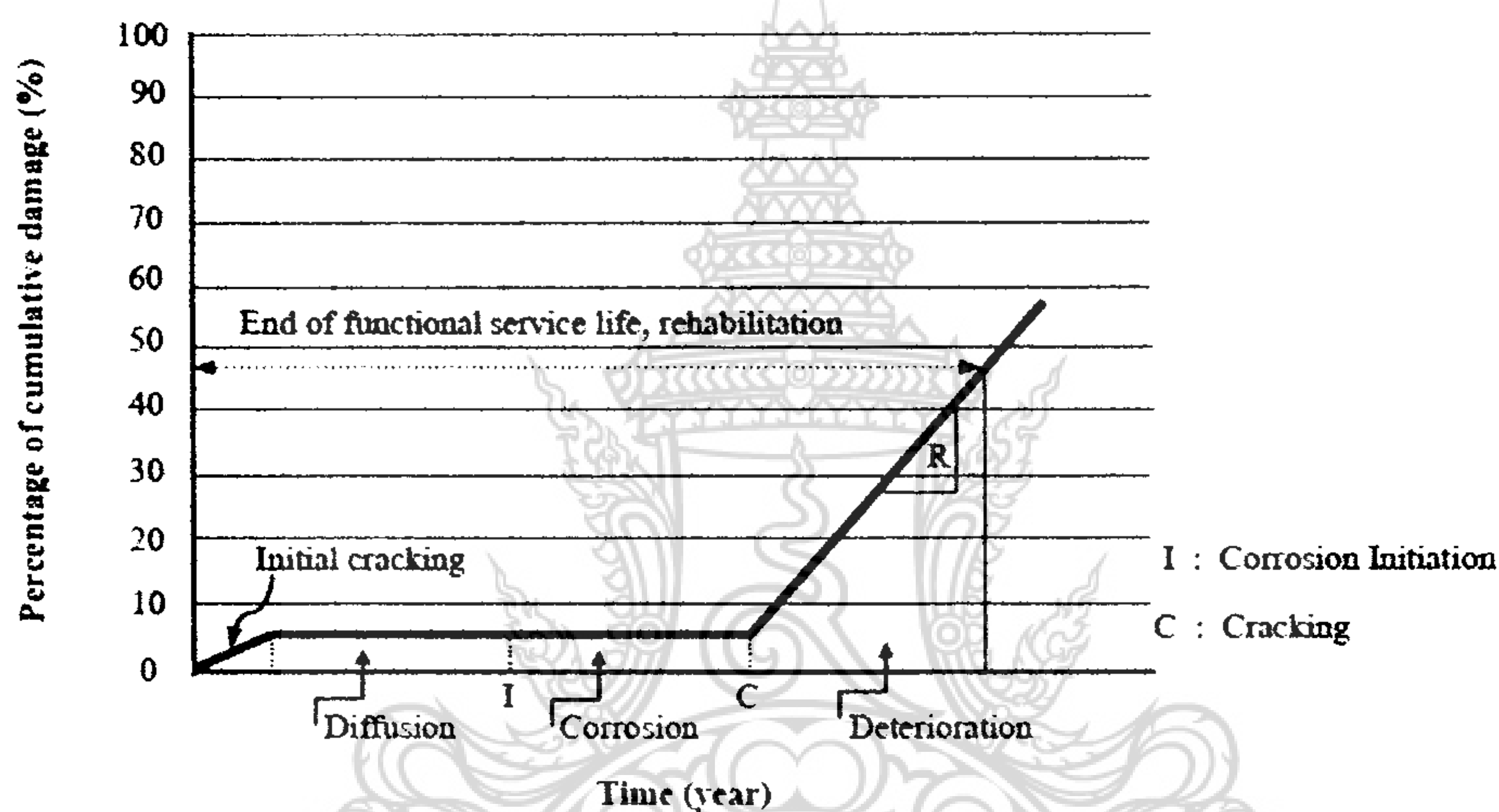


ภาพที่ 2-8 รูปแบบจำลองระยะเวลาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ที่มา : Tuutti, K.(1982)

Cady, P.D., and Weyers R.E. (1983) ได้นำเสนอแบบจำลองกระบวนการเสื่อมสภาพโดยคลอไรด์สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะหุ้มคอนกรีตหนา 2 นิ้ว (50 มม.) จากภาพที่ 2-9 เป็นรูปแบบการจำลองการแบ่งแยกที่ชัดเจนของระยะเวลาการเกิดสนิมมี 3 ระยะ ได้แก่ ช่วงระยะเวลาที่เกิดการแพร่ (Diffusion Phase) ช่วงระยะเวลาการเกิดสนิม (Corrosion Phase) และ



ช่วงระยะเวลาของการเสื่อมสภาพ (Deterioration Phase) สำหรับช่วงระยะเวลาการแพร่ผ่านถูกกำหนดให้เป็นช่วงเวลาที่คลอไรด์ไอออนแทรกซึมผ่านความหนาของคอนกรีตจนคลอไรด์อยู่ในระดับเพียงพอที่ทำให้เริ่มเกิดสนิมบนผิวของเหล็กเสริม ซึ่งปกติช่วงระยะเวลาของการแพร่ผ่านสามารถที่จะหาได้จากสูตร Fick's second Law (Crank, J.1956) สำหรับช่วงระยะเวลาที่ 2 เป็นช่วงระยะเวลาเริ่มแรกของการเกิดสนิมจนกระทั่งเริ่มเกิดรอยแตกร้าวและช่วงระยะเวลาที่ 3 เป็นช่วงระยะเวลาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างในระดับที่เกิดความเสียหายซึ่งในช่วงระยะเวลานี้ต้องทำการซ่อมแซมโครงสร้างให้กลับคืนสู่สภาพปกติ ข้อสังเกตให้พิจารณารอยแตกร้าวของระยะหุ้มคอนกรีตที่มีค่าตั้งแต่ 2.5% ของความลึกของระยะหุ้มคอนกรีตทั้งหมด



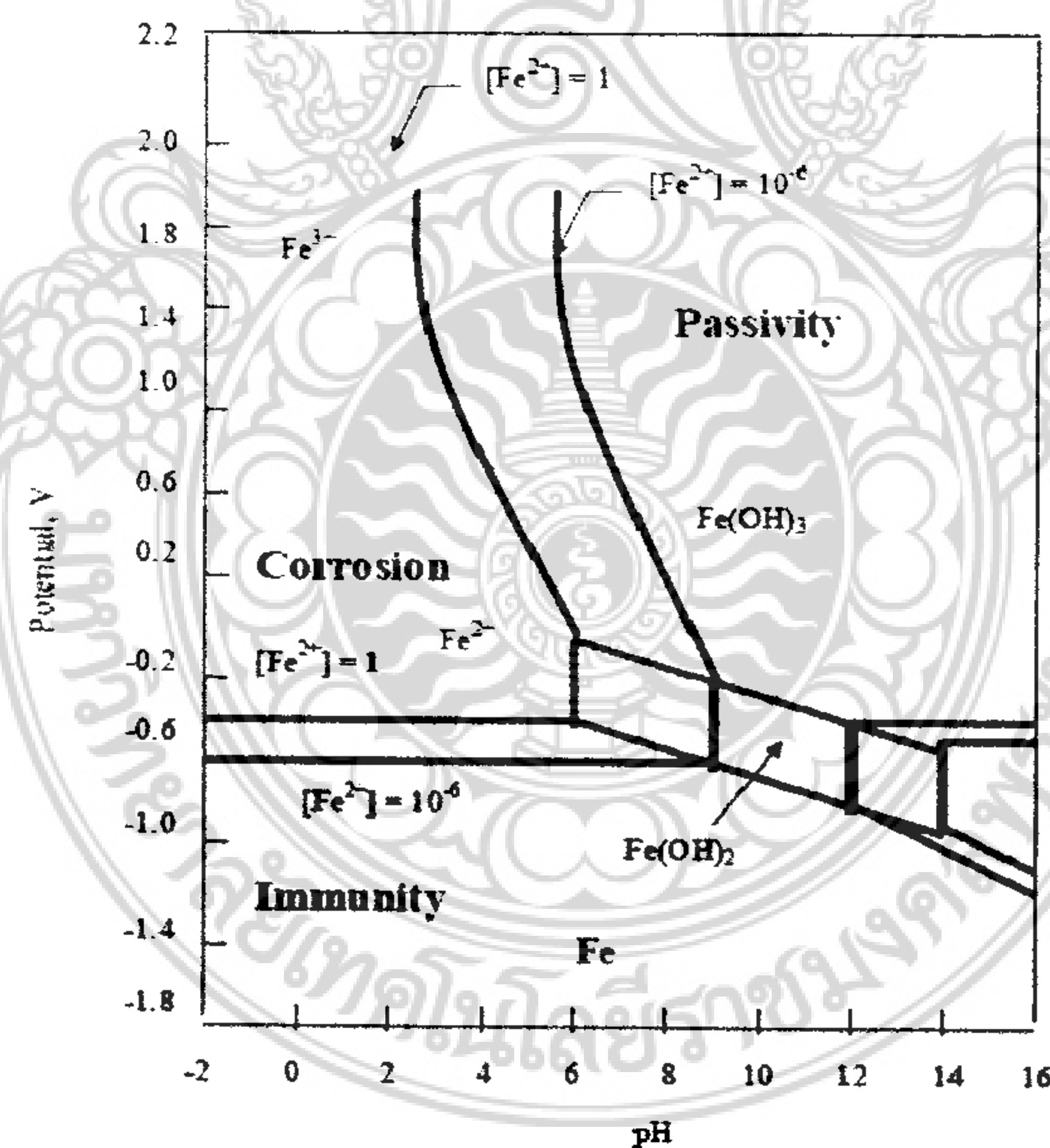
ภาพที่ 2-9 แบบจำลองกระบวนการเสื่อมสภาพ โดยคลอไรด์สำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะหุ้มคอนกรีตหนา 2 นิ้ว (50 มม.) ที่มา : Cady, P.D., and Weyers R.E. (1983)

Bazant ได้พัฒนาแบบจำลองทางฟิสิกส์-คณิตศาสตร์ ในการหาค่าของช่วงระยะเวลาที่ทำให้คอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการแตกร้าว โดยคลอไรด์แทรกซึมผ่านระยะหุ้มของคอนกรีตไปจนถึงผิวของเหล็กทำให้เกิดสนิมบนพื้นฐานของสภาวะการเกิดสนิม (Bazant., Z.P.,1979) แบบจำลองนี้เป็นช่วงระยะเวลาที่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว (time to cracking) เป็นฟังก์ชันของอัตราการเกิดสนิม ระยะหุ้มคอนกรีต ระยะห่างของเหล็กเสริมและคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตเช่น โมดูลัสยืดหยุ่น อัตราส่วนการขยายตัว (Poisson's ratio) และสัมประสิทธิ์การหดตัว สำหรับการวิเคราะห์ความไวของตัวแปรโดยใช้ทฤษฎีของ Bazant's เป็นสมการที่แสดงถึงตัวแปรของกำลังของคอนกรีต ระยะหุ้มคอนกรีต ขนาดของเหล็กเสริมระยะห่างเหล็กเสริมและอัตราการเกิดสนิมซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการหาช่วงระยะเวลาที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าว (Time to cracking)ของระยะหุ้มคอนกรีต



2.7 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

บนพื้นฐานของข้อมูลของปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับน้ำ (Pourbaix, M., 1976) ได้พัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าเปรียบเทียบกับแผนภาพของสภาวะบริเวณความเป็นกรดและด่าง (pH) ซึ่งชี้ให้เห็นถึงช่วงที่มีความเสถียรภาพของเทอร์โมไดนามิกส์เป็นฟังก์ชันของศักย์ไฟฟ้าและค่า pH และจากภาพที่ 2-10 แสดงถึงแผนภาพพอร์แบร์กของเหล็ก ซึ่งถูกแบ่งแยกออกเป็น 3 สภาวะคือ บริเวณส่วนที่เกิดสนิม บริเวณส่วนที่เกิดปฏิกิริยากับสารละลายน้อยและบริเวณส่วนที่ไม่เกิดสนิม สนิมที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีสภาพเป็นกรดจากแผนภาพจะเห็นเป็นช่องที่แคบสภาพความเป็นด่างจะผันแปรและทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดสนิมมากในขณะที่บริเวณอีก 2 ส่วนนั้นจะมีชั้นฟิล์มก่อตัวอยู่ซึ่งจะมีความเป็นด่างมากอยู่ในบริเวณ 2 ส่วนเหล่านี้จะอยู่ในสภาวะปกติไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นและในส่วนที่ 3 จะเป็นส่วนที่ปราศจากสนิม (Immunity) เนื่องจากในส่วนนี้มีสภาพความเป็นด่างที่มีเสถียรภาพสูงมากจึงเป็นสาเหตุทำให้เหล็กไม่เกิดสนิม ดังนั้นแผนภาพพอร์แบร์กจึงเป็นวิธีการเตรียมข้อมูลพื้นฐานภายใต้ความเข้าใจปฏิกิริยาการเกิดสนิมและจัดทำเป็นข้อกำหนดหลัก 2 ข้อสำหรับใช้กับแผนภาพนี้



ภาพที่ 2-10 แผนภาพกลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ที่มา: (Pourbaix, M., 1976)



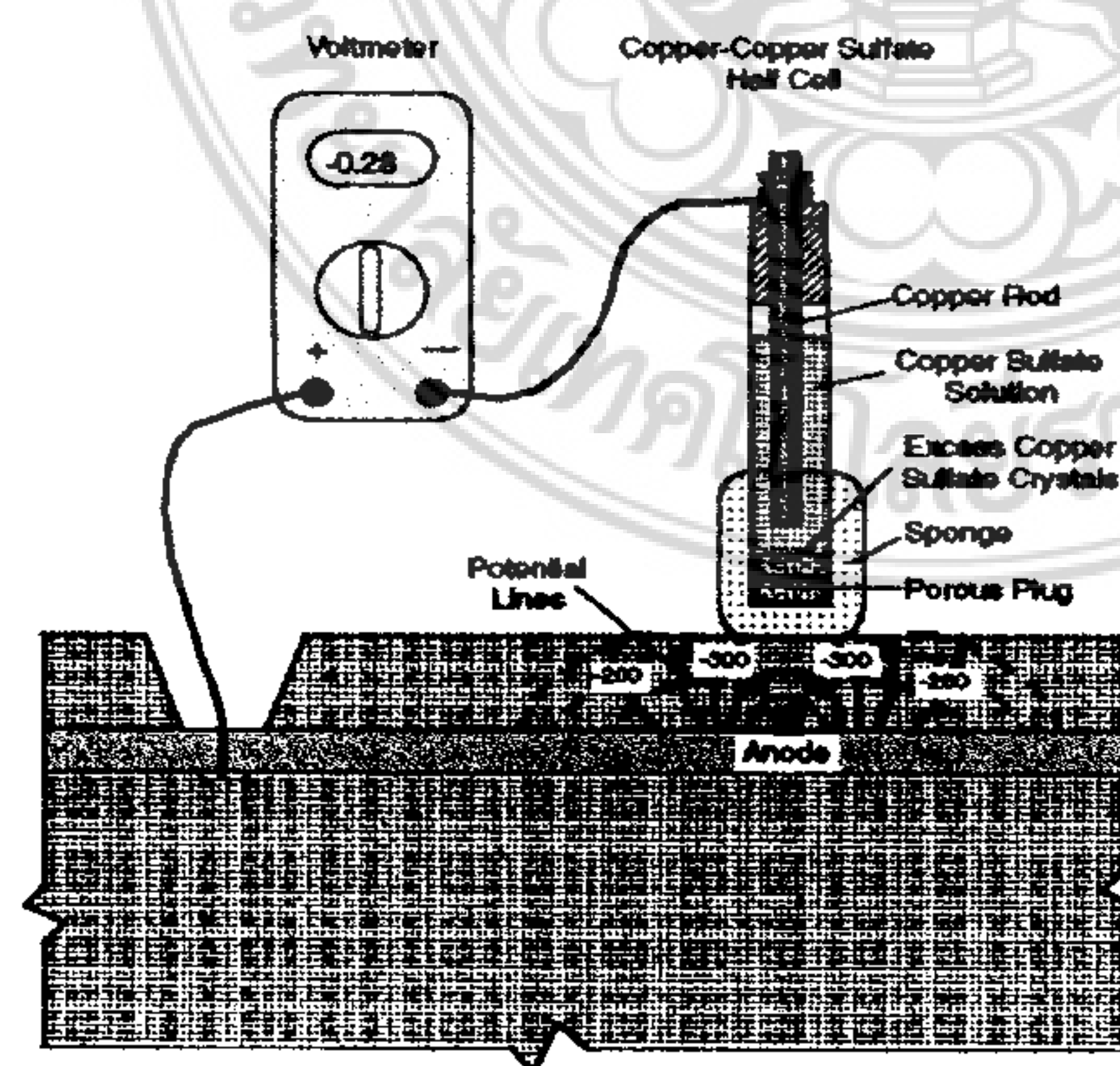
บทที่ 3

การตรวจวัดและแจ้งเตือนสนิมในคอนกรีต

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตไม่สามารถคาดการณ์ได้ชัดเจนต้องรองนกว่าคอนกรีตจะเกิดการเสียหายซึ่งสิ่งที่สามารถบ่งชี้ถึงการเสื่อมสภาพของโครงสร้างเช่น สนิมที่มีรอยค่างเป็นจุดๆ ที่ผิวของเหล็กเสริม รอยร้าวแตกแยกหลุดล่อนออกมาเป็นชั้นๆ สำหรับในการทำนายอายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมนั้นควรที่จะต้องกำหนดวิธีการซ่อมแซมหรือการทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กกลับคืนสู่สภาพใช้งานได้ตามปกติ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้เทคนิควิธีทดสอบแบบไม่ทำลายสำหรับใช้ประเมินสภาพการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและใช้วัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็ก

3.1 วิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

หลักการพื้นฐานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังที่ได้กล่าวมาแล้วสามารถที่จะตรวจสอบเพื่อพิสูจน์ได้ โดยนำเอาวิธีการนี้มาใช้ในการตรวจประเมินสภาพการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีเมื่อเหล็กเสริมถูกกัดกร่อนก็จะเกิดการไหลของกระแส ไฟฟ้าอยู่ทั่วในคอนกรีต (การแพร่กระจายของไอออน) ระหว่างบริเวณขั้วแอโนดและขั้วแคโทด โดยมีศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิมเกิดขึ้นโดยรอบๆเหล็กเสริมดังภาพที่ 3-1 แสดงให้เห็นถึงแนวเส้นของศักย์ไฟฟ้าที่ตัดผ่านกันจากผิวคอนกรีตถึงเหล็กเสริมและทุกๆจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าสามารถวัดค่าได้ ด้วยวิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นที่เส้นชั้นความสูง ทำได้โดยใช้ค่าของศักย์ไฟฟ้าบนผิวคอนกรีตที่วัดค่าได้นำมากำหนดจุดลงบนแผนที่ซึ่งจะแสดงให้เห็นค่าของศักย์ไฟฟ้าที่จุดต่างๆบนโครงสร้าง ความเป็นไปได้ของการเกิดสนิมให้พิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดค่าได้บนผิวคอนกรีตโครงสร้าง ถ้าหากมีค่าเป็นลบมากกว่าแสดงว่าบริเวณนั้นจะมีโอกาสที่จะเกิดสนิมมากที่สุด (Elsener, B. et al, 1990 and Browne, R.D, et. al, 1983)



ภาพที่ -3-1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้ทดสอบด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ตามมาตรฐาน ASTM C 876 โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต ที่มา: (ASTM C 876, 2002)



วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C-876 ดังแสดงในภาพที่ 3-1 เครื่องมือและอุปกรณ์ประกอบด้วย Copper-Copper Sulfate มีการเชื่อมต่อสายไฟกับโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานต่อไฟฟ้าสลับประสิทธิภาพสูงและในส่วนของ half-cell มีแท่งทองแดงแช่อยู่ในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวใช้เป็นเซลล์อ้างอิงสำหรับการวัดศักย์ไฟฟ้าของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีต การวัดค่าของศักย์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดของครึ่งเซลล์ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของศักย์ไฟฟ้าที่อ่านค่าได้และสำหรับการเชื่อมต่อของระบบ Half-Cell ทำได้โดยการเชื่อมต่อด้านที่เป็นบวกของโวลต์มิเตอร์ให้ติดกับเหล็กเสริมและอีกด้านของโวลต์มิเตอร์ที่เป็นลบให้เชื่อมติดต่อกับ Copper-Copper Sulfate โวลต์มิเตอร์ที่ใช้มีความละเอียดและประสิทธิภาพสูงเพียงพอสำหรับใช้อ่านค่าของศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่ำมากๆ แสดงได้ดังภาพที่ 3-2 การวัดศักย์ไฟฟ้าของเหล็กเสริมในคอนกรีตทำได้โดยใช้ Copper-copper sulfate half-cell เชื่อมต่อที่ผิวคอนกรีตเพื่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าครบวงจรโดยใช้ Porous Plug และฟองน้ำที่เปียกชื้นด้วยสารละลาย detergent เป็นสื่อตัวนำไฟฟ้า

ถ้าหากเหล็กเสริมเกิดสนิมแสดงว่าอิเล็กตรอนในเหล็กจะเคลื่อนที่จากเหล็กเสริมไปยัง half-cell เพราะว่าด้านปลายของโวลต์มิเตอร์มีการเชื่อมต่อภายในวงจรไฟฟ้างดภาพที่ 3-1 ค่าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์แสดงให้เห็นว่าแรงดันหรือศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลบ (ASTM G3) ในการวัดค่า half-cell potential เป็นการวัดศักย์ไฟฟ้าแบบ open circuit potential เพราะเป็นการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขที่ไม่มีการวัดค่าของกระแสไฟฟ้าในวงจร (ASTM G15) ค่าของแรงดันไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้ที่ผิวของคอนกรีตจะมีค่าเป็นลบมากขึ้นสามารถอธิบายได้ว่าเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตยังมีอิเล็กตรอนส่วนเกินอีกมากจึงมีความเป็นไปได้สูงที่เหล็กเสริมจะยังเป็นสนิมต่อไปได้อีก ในการอ่านค่าศักย์ไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อยู่ในตำแหน่งภายใต้ Copper-copper sulfate reference cell (Van Daveer, J.R.,1975) อย่างไรก็ตามค่าที่ถูกต้องๆเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C876 และวิธีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้านี้ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับคอนกรีตและเหล็กเสริมที่มี epoxy เคลือบอยู่ที่พื้นผิว

วิธีเตรียมการทดสอบทำได้โดยกำหนดตำแหน่งของจุดให้มีลักษณะเป็นตาราง โดยมีระยะห่างให้เหมาะสมตามลักษณะของโครงสร้างและปัจจัยที่ทำให้เกิดความผิดพลาด เช่นจุดที่กำหนดถ้ามีระยะห่างมากเกินไปหรือการเตรียมข้อมูลไม่เหมาะสมเพียงพอสำหรับการประเมินค่าในขณะที่การกำหนดระยะห่างของเหล็กเสริมเต็มพื้นที่ก็จะทำให้มีค่าใช้ง่ายในการสำรวจเพิ่มขึ้นเช่นในการสำรวจพื้นผิวคอนกรีตของสะพาน โดยทำตามมาตรฐาน ASTM C 876 แนะนำให้ใช้ระยะห่าง 1.20 ม. ถ้าความแตกต่างของแรงดันระหว่างจุดที่อยู่ใกล้กันมีค่าเกินกว่า 150 มิลลิโวลต์ ให้ถือวาระยะห่างนั้นใช้ได้ อย่างไรก็ตามมีคำแนะนำอื่นๆ ที่กำหนดให้ระยะห่างควรมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของ 1.20 ม. สามารถให้ค่าความน่าเชื่อถือสำหรับการประเมินค่าการเกิดสนิมที่ยังดำเนินการอยู่และขยายออกไป (Clemena, G.G., Jackson, D.R, et al., 1992)

ค่าที่ยอมรับได้จากการทดสอบคือคอนกรีตต้องมีความชื้นอย่างเพียงพอที่จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรเป็นเหตุผลที่สำคัญในการวัดค่าและถ้าการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ด้วยเวลาต้องทำตามมาตรฐาน ASTM C 876 ก่อนการทดสอบคอนกรีตต้องมีความเปียกชื้นเพียงพอและในขณะ

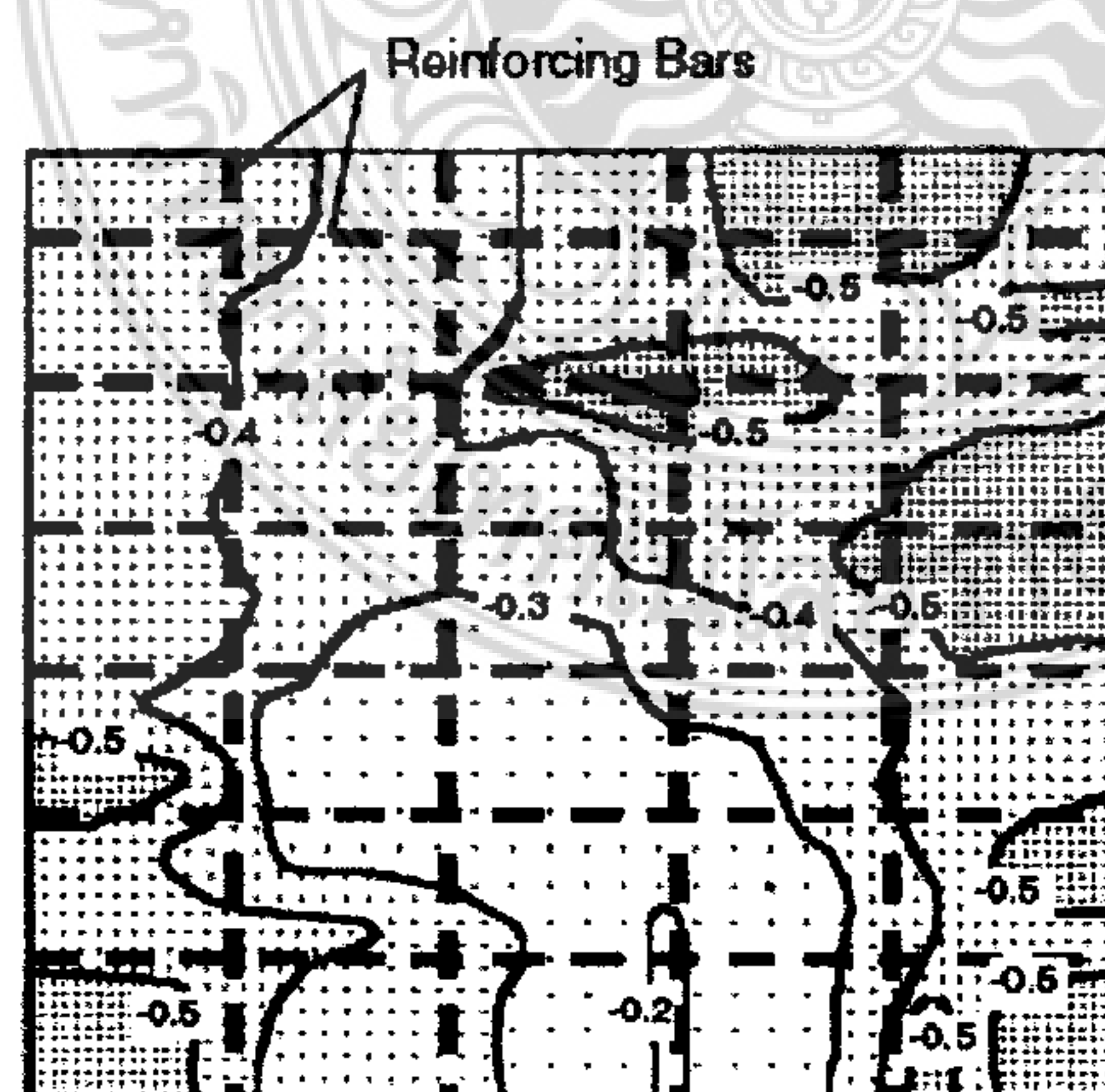


การทดสอบค่าที่วัดได้ไม่ควรเปลี่ยนแปลงมากกว่า ± 20 มิลลิโวลต์ ภายใน 5 วินาที (ASTM C 876) ถ้าหากค่าที่วัดได้มีความเสถียรไม่เพียงพอ อาจเป็นเพราะว่ากระแสไฟฟ้าภายในวงจรเกิดการหันเหทิศทางหรือความต้านทานของกระแสไฟฟ้าภายในวงจรมีมากเกินไป สำหรับในกรณีที่ไม่ควรนำมาใช้กับวิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ทำการทดสอบอยู่ภายนอกช่วง 17 ถึง 28° C วิธีการทำให้การทดสอบถูกต้องมีความน่าเชื่อถือให้ทำตามมาตรฐาน ASTM C 876 สำหรับใช้วัดค่าแรงดันไฟฟ้า

3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

การวิเคราะห์ข้อมูลตามมาตรฐาน ASTM C-876 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่อ่านได้สามารถนำมาใช้ร่วมกับข้อมูลอื่นๆ เช่น ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต ความลึกของคาร์บอนในคอนกรีต สำหรับการแตกและหลุดล่อนของชั้นคอนกรีตที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมเปิดเผย ซึ่งการรวบรวมสรุปข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดสนิมที่ได้จากการสำรวจอย่างเป็นระบบด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สามารถแสดงให้เห็นได้ 2 แนวทางคือ 1. มีลักษณะเป็นแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าเท่ากับตลอดทั้งเส้น 2. เป็นไดอะแกรมของความถี่สะสมของศักย์ไฟฟ้า ในขณะที่ขบวนการรายงานค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการสำรวจต้องระบุให้ชัดเจนในการใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการสำรวจนำมาสรุปจัดทำเป็นแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าซึ่งสามารถทำได้โดยนำเอาค่าที่ได้จากการทดสอบในแต่ละจุดมาสร้างลงบนแปลนตามอัตราส่วนของพื้นที่ทั้งหมดที่ได้ทำการทดสอบ สำหรับค่าแรงดันที่อ่านได้จาก half-cell ในแต่ละจุดของการทดสอบให้ทำเครื่องหมายไว้บนแปลนและเขียนเส้นชั้นความสูงซึ่งมีค่าความต่างศักย์เท่ากัน โดยใช้ค่าของแรงดันที่วัดได้ดังแสดงในภาพที่ 3-2 เป็นตัวอย่างของแผนที่เส้นชั้นความสูงที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับตลอดความยาวทั้งเส้นตามมาตรฐาน ASTM C-876 แรงดันไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดที่วัดค่าได้ในแต่ละช่วงของเส้นชั้นความสูงไม่ควรมีค่าต่างกันเกิน 100 มิลลิโวลต์



ภาพที่ 3-2 ตัวอย่างแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าที่สำรวจได้จาก half-cell potential

ที่มา : (ASTM C 876, 2002)



วิธีการของโคอะแกรมความถี่สะสมของศักย์ไฟฟ้าทำได้โดยการนำข้อมูลของศักย์ไฟฟ้ามาเขียนเป็นแผนผังแบบร่างลงบนกระดาษเพื่อหาความน่าจะเป็นสอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM C-876 โดยนำข้อมูลที่ได้จากการสำรวจทั้งหมดมาเขียนเป็นกราฟเส้นที่มีการปรับเปลี่ยนให้เข้ามาตรฐานพอดิ (best-fit straight line) จากโคอะแกรมความถี่สะสมนำมาใช้โดยกำหนดค่าที่อ่านได้ของศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นร้อยละซึ่งเป็นค่าที่ให้ความแน่นอนเมื่อมีความเป็นลบมากกว่าและสามารถใช้ระบุเป็นค่าของการเกิดสนิมที่ระดับต่างๆ กัน (Elsener, B., et al, 1990) จากทั้งสองวิธีการจะสอดคล้องกับมาตรฐาน ASTM C 876 สามารถที่จะใช้ในการประเมินผลได้คือเป็นวิธีการเชิงตัวเลขและเป็นเทคนิคที่แสดงความแตกต่างกันของศักย์ไฟฟ้า (potential difference technique) สำหรับวิธีการเชิงตัวเลขจะบ่งชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการเกิดสนิม

มาตรฐาน ASTM C-876 ให้เป็นแนวทางในการทดสอบดังนี้ ใช้สำหรับกรณีขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Copper-copper sulfate reference electrode ดังนี้

- ถ้าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นบวกมากกว่า -200 มิลลิโวลต์ มีความเป็นไปได้สูงที่เหล็กจะไม่เกิดสนิม
- ถ้าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นลบมากกว่า -350 มิลลิโวลต์ มีความเป็นไปได้สูงที่เหล็กจะเกิดสนิม
- ความไม่แน่นอนในการเกิดสนิมเมื่อค่าแรงดันอยู่ในช่วง -200 ถึง -350 มิลลิโวลต์

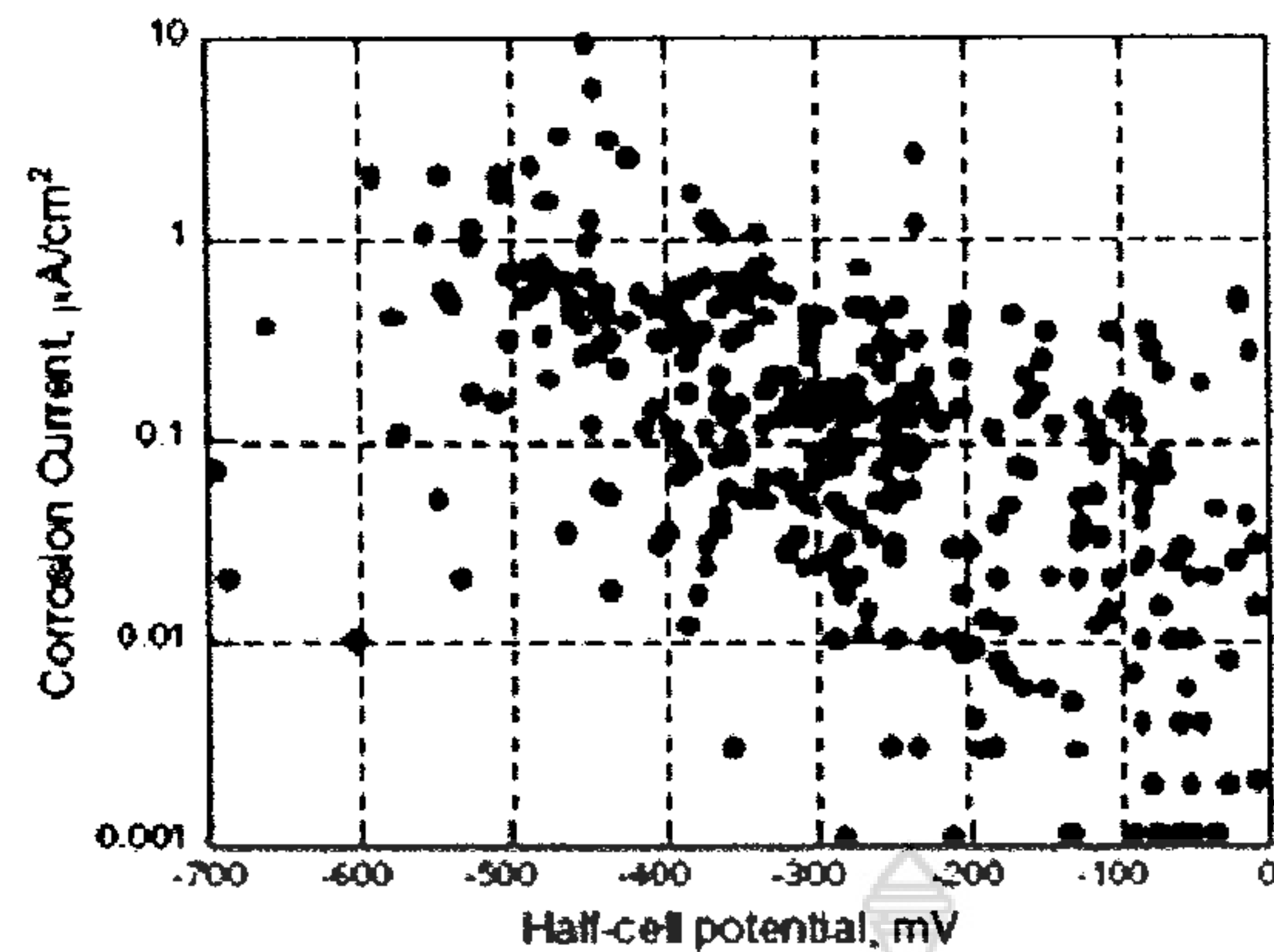
อย่างไรก็ตามขอแนะนำให้ไปประยุกต์ใช้งานบนหลักการเชิงตัวเลขไม่ควรใช้ในสถานะเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- การเกิด Carbonation ได้ขยายกว้างออกไปจนถึงระดับของเหล็กเสริมในคอนกรีต
- การประเมินสภาพคอนกรีตที่อยู่ภายในที่จับเก็บไม่ได้อยู่ในสภาพเปียกชื้น
- เปรียบเทียบการกัดกร่อนของคอนกรีตที่อยู่ภายนอกกับความชื้นที่มีความแปรผันสูงหรือปริมาณ

ออกซิเจนที่มีอยู่ในคอนกรีต

จากข้อความข้างบนเป็นข้อแนะนำการระวังป้องกันในขณะทดสอบเพราะว่าเป็นสิ่งสำคัญต่อความต้านทานของคอนกรีตและออกซิเจนที่มีอยู่ทำให้เกิดอัตราการเกิดสนิมและจากภาพที่ 3-3 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ไม่ดีระหว่างวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์กับวิธีการวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมโดยวิธีการวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ (Feliu, S., Gonzalaz, J.A., and Andrade, C, 1996) สามารถอธิบายได้ว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมมีค่าน้อยกว่า $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ให้พิจารณาว่าเหล็กเสริมไม่เกิดสนิมแต่ถ้ามีค่ามากกว่า $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ให้พิจารณาว่าเหล็กเสริมจะมีโอกาสเกิดสนิมสูงมากดังแสดงตามภาพที่ 3-3 การนำไปประยุกต์ใช้งานต้องทำตามข้อแนะนำตามมาตรฐาน ASTM C-876





ภาพที่ 3-3 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม(i_{corr})กับศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ที่มา : (Feliu,S.,Gonzalez,J.A.,and Andrade,C.,1996)

วิธีการของศักย์ไฟฟ้าที่มีความแตกต่างกัน (potential difference technique) สำหรับบริเวณพื้นที่ๆเกิดสนิมพื้นที่บริเวณนั้นจะแสดงให้เห็นถึงความลาดเอียงของศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าแตกต่างกันซึ่งเป็นพื้นฐานของแผนภูมิเส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าสำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นเส้นชั้นความสูง (equipotential contour) ระยะห่างของเส้นชั้นความสูงของค่าแรงดันที่เป็นรูปปิดแสดงให้เห็นว่าบริเวณนี้มีความลาดเอียงสูง ซึ่งบางครั้งในทางปฏิบัติค่าของแรงดันไฟฟ้าที่วัดค่าได้เปลี่ยนแปลงมากเกินไป ดังนั้นตัวบ่งชี้ที่แสดงให้เห็นการเกิดสนิมจะเป็นพื้นที่ผิว เช่นแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงมากกว่า 100 มิลลิโวลต์จะต้องมีพื้นที่มากกว่า 5 ตารางเมตร ดังนั้นวิธีการของ potential difference technique เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปในการบ่งชี้ให้เห็นถึงบริเวณที่เกิดสนิมซึ่งมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการใช้เทคนิคเชิงตัวเลข (Elsener, B., Dawson, J.L., et. al.,1990)

การอ่านค่าศักย์ไฟฟ้าในสถานะที่เหล็กเกิดสนิมอย่างมีเหตุผลนั้นสามารถพิจารณาได้จากคอนกรีตจะต้องมีความชื้นอย่างเพียงพอและผู้ใช้ต้องมีความเข้าใจและยอมรับวิธีการใช้งานเมื่อคอนกรีตมีความชื้นไม่เพียงพอสำหรับใช้ในการวัดค่าซึ่งเป็นสิ่งสำคัญ นอกจากนี้มีหลายองค์ประกอบที่มีผลกระทบต่อขนาดของศักย์ไฟฟ้าที่อ่านค่าได้ ดังนั้นองค์ประกอบดังกล่าวจึงไม่สามารถที่จะให้ค่าที่ถูกต้องแท้จริงตามสภาพการเกิดสนิมได้ (Elsener, B., Dawson, J.L., et. al., 1990)

ปัจจัยหลากหลายที่มีผลกระทบกับวิธีการทดสอบการเกิดสนิมโดยผู้เชี่ยวชาญทางด้านการศึกษาการเกิดสนิมได้ให้คำแนะนำที่เหมาะสมของวิธีการสำรวจด้วยศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้ (ASTM C-876)

- คอนกรีตต้องอยู่ในสภาพที่อิ่มตัวด้วยน้ำ
- คอนกรีตเกิด Carbonated ที่ระดับความลึกของเหล็กเสริม
- เหล็กเสริมที่เคลือบด้วย (galvanized)



ในการสำรวจค่าศักย์ไฟฟ้าควรมีการทดสอบเพิ่มเติมด้วยการทดสอบ Carbonation และปริมาณคลอไรด์ไอออนในคอนกรีต ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบควรสรุปเป็นข้อมูลให้ชัดเจนของค่าศักย์ไฟฟ้าที่สำรวจวัดค่าได้ที่แสดงให้เห็นถึงบริเวณที่เกิดสนิมขณะที่ทำการทดสอบเวลานั้นและเงื่อนไขสภาพสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง

3.2 ความต้านทานของคอนกรีต

วิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นวิธีการที่แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ถึงบริเวณที่เหล็กจะเกิดสนิมในช่วงเวลานั้นที่ทำการวัดค่า จากที่ได้มีการอธิบายมาแล้วนั้น สรุปได้ว่าหลังจากที่เหล็กเกิดการสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม (Depassivation) และอัตราการเกิดสนิมจะขึ้นอยู่กับออกซิเจนที่ยังทำปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดและยังขึ้นอยู่กับความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีตด้วยทำให้ง่ายต่อการแพร่ของอิออนที่มีอยู่ทั่วไปในคอนกรีตระหว่างบริเวณขั้วแอโนดและขั้วแคโทด นอกจากนี้ความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับผิวของโพรงช่องว่างเล็กๆซึ่งเป็น โครงสร้างเล็กๆของเพสต์และปริมาณความชื้นของคอนกรีต ดังนั้นประโยชน์ที่ได้จากการทดสอบและสำรวจด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีต ค่าความต้านทานไฟฟ้ามักเป็นหน่วยเป็นลูกบาศก์ของวัสดุของความต้านทาน (โอห์ม) ต่อความยาว (Millard, S.G., et. al., 1989) โดยที่ ตัวนำทางไฟฟ้าเป็นความต้านทาน R ของพื้นที่ คือ A และความยาวเป็น L ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทาน ρ ดังสมการที่

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3-1)$$

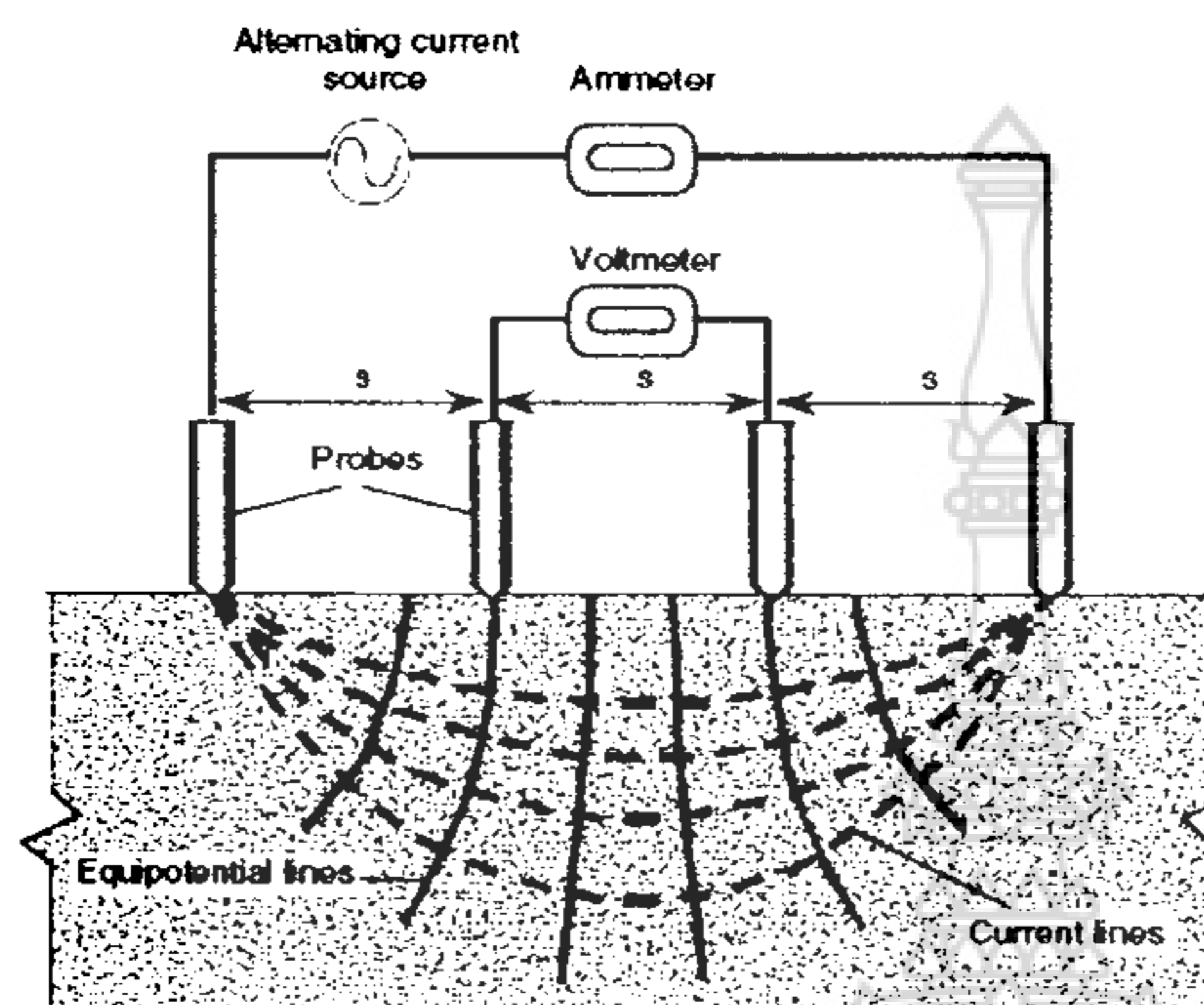
มาตรฐานวิธีการทดสอบการวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตยังไม่มีการจัดทำเป็นมาตรฐาน แต่มีเทคนิคที่ใช้แล้วประสบความสำเร็จ ดังแสดงในภาพที่ 3-4 (Millard, S.G. and et al., 1989)

จากพื้นฐานของหลักการนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันเป็นระบบของ 4 ขั้วไฟฟ้า (Wenner, F., 1915) ซึ่งได้จัดทำขึ้นเป็นมาตรฐานสำหรับใช้ในการวัดค่าความต้านทานของดิน (ASTM G-57, 2002) โดยที่ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 มีระยะห่างเท่ากันเป็นระบบการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้ากับผิวของคอนกรีต โดยใช้ (cream) เป็นสื่อตัวนำไฟฟ้า (Millard, S.G., Ghassemi, M.H., and Bungey, J.H., 1990) จากภาพที่ 3-6 มีหลักการทำงานคือ ขั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกจะเชื่อมต่อกับแหล่งที่ให้กระแสไฟฟ้าและขั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายใน 2 ขั้วจะเชื่อมต่อกับเครื่องมืออ่านค่าแรงดันไฟฟ้า (โวลต์มิเตอร์) ดังนั้นค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีตสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 11 (Millard, S.G., Wenner, F., A., et. al., 1990)

$$\rho = \frac{2\pi sV}{I} \quad (3-2)$$



จากสมการที่ 11 ได้มาจาก Wenner ภายใต้สมมติฐานของวัสดุเป็นแบบ (semi-infinite) และมีคุณสมบัติเหมือนกัน ดังนั้นความสัมพันธ์ที่ให้มาจะทำให้การวัดค่าความต้านทานได้ค่าที่ถูกต้องเมื่อสมมติฐานมีข้อมูลเป็นที่เพียงพอและทุกๆค่าของการเบี่ยงเบนจากข้อสมมติฐานของ Wenner's จะนำไปสู่ความแตกต่างระหว่างค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณและค่าความต้านทานที่แท้จริงของวัสดุ (Millard, S.G., Ghassemi, M.H., and Bungey, J.H., 1990)



ภาพที่ 3-4 การทดสอบวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตด้วย 4 ขั้วไฟฟ้า

ที่มา : (Bungey, J.H., 1989)

Millard, S.G., et al., 1990. นำเสนอผลที่ได้จากการทดลองศึกษาและวิเคราะห์ให้เป็นที่ยอมรับของอันดับขนาดที่มีความผิดพลาดระหว่างค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณและค่าความต้านทานที่แท้จริงเมื่อนำสมการที่ 3.2 ไปประยุกต์ใช้กับชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตขนาดเล็ก ซึ่งมีหนึ่งตัวแปรที่ต้องพิจารณาคือระยะห่างที่น้อยที่สุดของขั้วไฟฟ้า เพราะเป็นส่วนประกอบของเพสต์และมวลรวมจะให้ค่าความต้านทานที่แตกต่างกัน จึงต้องให้ความสำคัญกับระยะห่างของขั้วไฟฟ้าอย่างเพียงพอ ดังนั้นค่าความต้านทานของคอนกรีตควรจะเป็นค่าเฉลี่ย สำหรับระยะห่างน้อยที่สุดของขั้วไฟฟ้าขึ้นอยู่กับขนาดโตสุดของมวลรวม หยาบใช้เป็นค่าต่ำที่สุดของระยะห่าง ในขณะที่ระยะห่างก็ยังเป็นตัวแปรที่กำหนดระดับความลึกซึ่งมีผลกระทบต่อค่าการวัดด้วยเหมือนกัน ในขณะที่ชิ้นส่วนที่มีลักษณะตันหรือบางก็ควรต้องมีความสอดคล้องกับระยะห่างของขั้วไฟฟ้าด้วย

บนพื้นฐานจากการศึกษา Millard, S.G., et al., 1990. ได้แนะนำระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้ได้เหมาะสมมีค่าประมาณ 50 มิลลิเมตร ขนาดความกว้างและความลึกของชิ้นส่วนโครงสร้างควรจะมีอย่างน้อย 4 เท่าของระยะห่างขั้วไฟฟ้า นอกจากนี้ระยะจากขอบชิ้นส่วนไม่ควรน้อยกว่า 2 เท่าของระยะห่างของขั้วไฟฟ้า เมื่อขนาดต่างๆเหล่านั้นน้อยไม่เพียงพอ ค่าความต้านทานที่คำนวณได้จากสมการที่ 3-2 ก็จะทำให้ค่ามากเกินไป ปัจจัยอื่นที่มีผลกระทบต่อค่าการคำนวณค่าความต้านทานแสดงให้เห็นได้ชัดเจน เช่น ชิ้นพื้นผิวที่บางมีผลทำให้ความต้านทานของคอนกรีตและเหล็กเสริมมีค่าต่ำกว่าค่าที่แท้จริง ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ให้ผลลัพธ์โดยตรงกับค่าความต้านทาน สำหรับปัจจัยอื่นที่มีผลกระทบต่อเหล็กเสริม เช่น



ความลึกของระยะหุ้มคอนกรีตรวมถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมที่สูญเสียไปจะทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างรับกำลังลดลง

เทคนิคที่ใช้วัดค่าความต้านทานที่ได้จัดทำขึ้นเป็นวิธีการ Linear polarization (Broomfield,J.,1966) โดยใช้โพรบ(Probe) เป็นอุปกรณ์ที่มีสายเชื่อมต่อกับเครื่องมือ โพลาร์ไรซ์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่อยู่โดยรอบและวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตด้วยวิธีการ Linear polarization ผลกระทบจากการวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตระหว่างเหล็กเสริมและตำแหน่งที่ probe วางบนผิวคอนกรีต ยังไม่ผู้แต่งใดเผยแพร่หรือตีพิมพ์บทความโดยเปรียบเทียบการวัดค่าความต้านทานโดยใช้ 4 probe และ 1 probe การพัฒนาวิธีการของ single-probe และได้ให้ข้อเสนอแนะดังแสดงในตารางที่ 3-1 แสดงถึงความสัมพันธ์ของความต้านทานคอนกรีตกับความเสียหายของการเกิดสนิม (Feliu,S.,Gonzalez, J.A.,and Andrade, C.,1996)

ตารางที่ 3-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเสียหายของการเกิดสนิม

ความต้านทาน ($k\Omega \cdot cm$)	ความเสียหายของการเกิดสนิม
>100 ถึง 200	ไม่เกิดสนิม ; คอนกรีตมีสภาพแห้ง
50 ถึง 100	อัตราการเกิดสนิมต่ำ
10 ถึง 50	ความเหมาะสมในการเกิดสนิมสูงเมื่อเหล็กเริ่มกัดกร่อน
< 50	ความต้านทาน ไม่สามารถควบคุมอัตราการเกิดสนิมได้

ที่มา : Feliu, S. et al., 1996.

ในอีกกรณีหนึ่ง Bungey ได้ให้แนวทางถึงความแตกต่างกันของข้อมูลระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเสียหายของการเกิดสนิม เมื่อเหล็กเสริมสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิมดังแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเป็นไปได้ในการเกิดสนิม

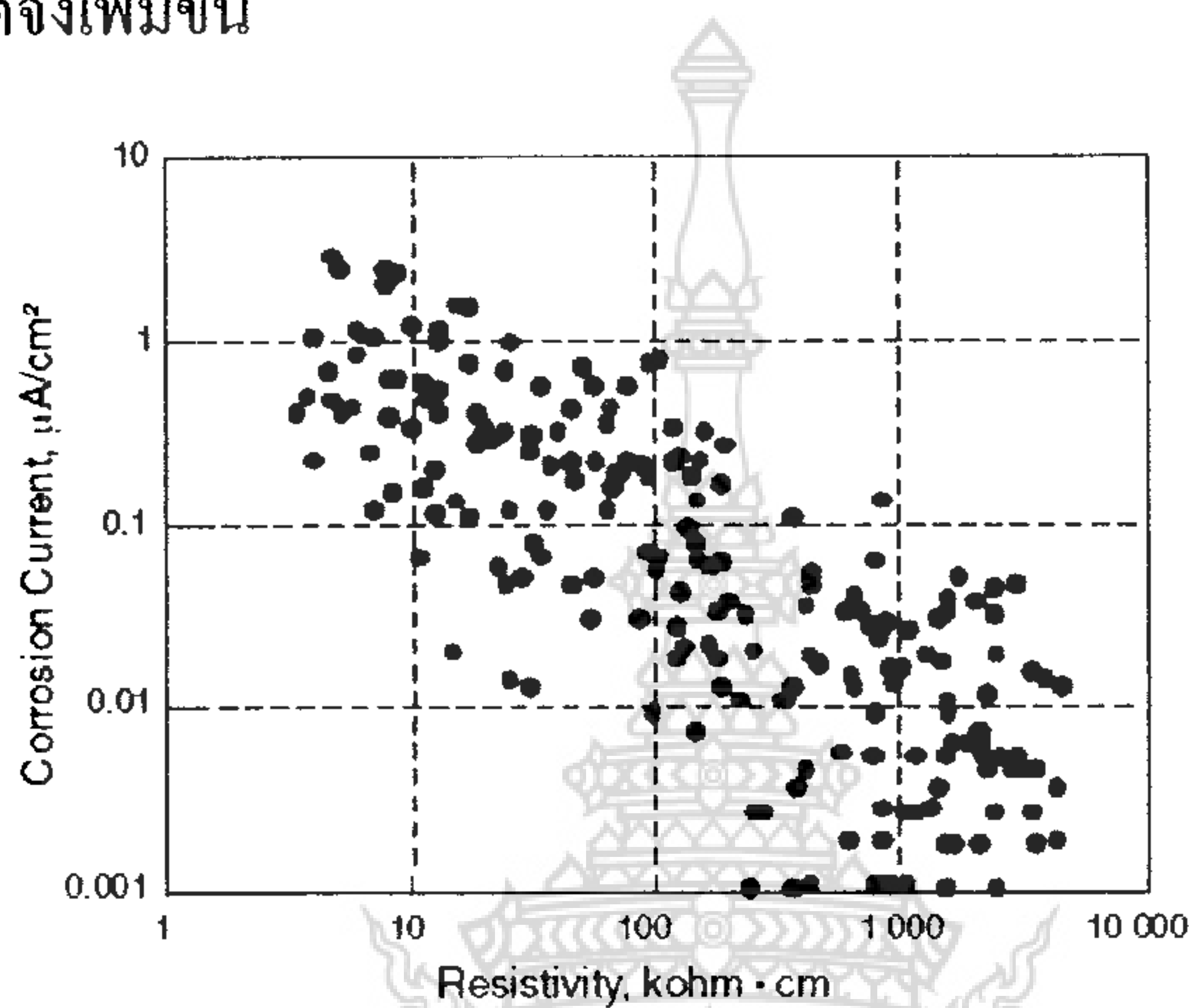
ความต้านทาน ($k\Omega \cdot cm$)	ความเป็นไปได้ของการเกิดสนิม (Nonsaturated Concrete)
> 20	ต่ำ
10 ถึง 20	ต่ำ/เหมาะสม
50 ถึง 10	สูง
< 5	สูงมาก

ที่มา : Bungey, J.H., 1989.

จากภาพที่ 3-5 แสดงถึงความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดสนิมของคอนกรีตและความต้านทานของคอนกรีต (Feliu, S., Gonzalez, J.A., and Andrade, C., 1996) เปรียบเทียบกับรูปที่ 3-3 จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อเหล็กเสริมสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม ความต้านทานของคอนกรีตจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดสนิมได้ดีกว่าการวัดค่าด้วยวิธีการ half-cell potential



สรุปโดยย่อ การวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตเป็นการจัดเตรียมข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการประเมินความเป็นไปได้ของระดับการเกิดสนิมที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นการนำเอาประโยชน์ที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาใช้ ค่าความต้านทานที่สูงที่ได้จากการสำรวจศักย์ไฟฟ้าแต่อัตราการเกิดสนิมอาจจะมีค่าต่ำ การอ้างอิงถึงความต้านทานของคอนกรีตที่มีความสัมพันธ์กับการแพร่กระจายของไอออนไปโดยทั่วคอนกรีตภายใต้การกระทำของศักย์ไฟฟ้าโดยรอบๆขั้วแอโนดและขั้วแคโทด คอนกรีตที่มีความต้านทานเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณของโพรงช่องว่างในเพสต์มีจำนวนลดลงส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นอายุการใช้งานของคอนกรีตจึงเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 3-5 เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{corr}) และค่าความต้านทานของชิ้นส่วนคอนกรีต
ที่มา : (Feliu, S., Gonzalez, J.A., and Andrade, C., 1996)

3.3 ความต้านทานโพลาไรซ์เชิงเส้น

เนื่องจากวิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (half-cell potential) เป็นวิธีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิมที่ให้ค่าโดยประมาณ ซึ่งมีข้อเสียกล่าวคือวิธีการของ (half-cell potential) ไม่สามารถที่จะแสดงค่าของอัตราการเกิดสนิมได้โดยตรง ซึ่งมีหลายวิธีการที่พยายามหาค่ากระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมเพื่อนำเอาไปคำนวณหาอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งวิธีการของ Linear polarization resistance (LPR) เป็นอีกวิธีการหนึ่งเป็นที่ยอมรับและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน (Flis, J., Sehgal, A., et al.1992) และได้จัดทำเป็นมาตรฐานวิธีการทดสอบ (Cady and Gannon 1992; Flis et al.1992)

หลักการของเทคนิคความต้านทานโพลาไรซ์เป็นวิธีการที่ดีสำหรับใช้หาค่าอัตราการเกิดสนิม (Corrosion rate) ของเหล็กเสริม สอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM G-59 เป็นเทคนิคพื้นฐานของการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงใน Open Circuit potential (OCP) ของเซลล์ตัวนำไฟฟ้าแบบ Short-Circuited เมื่อมีกระแสไฟฟ้าจากภายนอกไหลผ่านเซลล์ จะทำให้ไฟฟ้าครบวงจรซึ่งวิธีการวัดของ LPR ที่นิยมใช้กันมี 2 วิธีการเรียกว่า Potentiostatically ทำได้โดยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็นช่วงทำให้ศักย์ไฟฟ้า (ΔE) เกิดการ



เปลี่ยนแปลงซึ่งแปรผันไปตามค่าของกระแสไฟฟ้า (ΔI) ในขณะเวลานั้นสำหรับวิธีที่ 2 เรียกว่า Galvanostatically ทำได้โดยเพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็นช่วงทำให้กระแสไฟฟ้า (ΔI) เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งแปรผันไปตามค่าศักย์ไฟฟ้า (ΔE) ในขณะเวลานั้น โดยที่ค่าของแรงดันที่เปลี่ยนแปลงต้องอยู่ภายในช่วง 10-30 มิลลิโวลต์เท่านั้นค่าที่วัดได้ถึงจะมีความถูกต้อง ซึ่งค่าเหล่านี้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (ΔE) และการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า (ΔI) ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่าง $\Delta E/\Delta I$ เรียกว่าความต้านทานโพลาไรซ์ (R_p) ดังสมการที่ 3-3 เพราะว่ากระแสไฟฟ้าจะแสดงในเทอมต่อหน่วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าเป็น Polarized โดยที่ (R_p) มีหน่วยเป็น โอห์มพื้นที่ (ohms.cm^2) ตามมาตรฐาน ASTM G15

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad (3-3)$$

Stern and Geary (1957) ได้จัดทำขึ้นภายใต้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดสนิมของขั้วแอโนดและความต้านทานโพลาไรซ์ ซึ่งอธิบายได้จากความสัมพันธ์ของการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดและแคโทด และหาได้จากความลาดชันของกราฟเส้นโพลาไรซ์ของปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด เมื่ออัตราการเกิดสนิมแสดงอยู่ในรูปความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมซึ่งแปรผันโดยตรงกับความต้านทานโพลาไรซ์ (R_p) (ASTM G59) แสดงไว้ดังสมการที่ 13

$$I_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p} \quad (3-4)$$

โดยที่

- I_{corr} = ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม ($\mu\text{A/cm}^2$)
- B = ค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้า (mV)
- R_p = ความต้านทานโพลาไรซ์ (Ohms.cm^2)

โดยค่า B เป็นค่าคงที่ของ Stern-Geary โดยทั่วไปใช้ค่าเท่ากับ 25 mV เป็นช่วงที่เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเกิดสนิม (Active steel) และใช้ค่าเท่ากับ 50 mV สำหรับเหล็กเสริมในคอนกรีตยังไม่เกิดสนิม (passive steel) (K.R. Gowars, S.G. Millard., et al., 1994) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (i_{corr}) หาได้จากพื้นที่ของเหล็กเสริมตรงบริเวณที่วัดค่าซึ่งคำนวณได้ตามสมการที่ 3-4

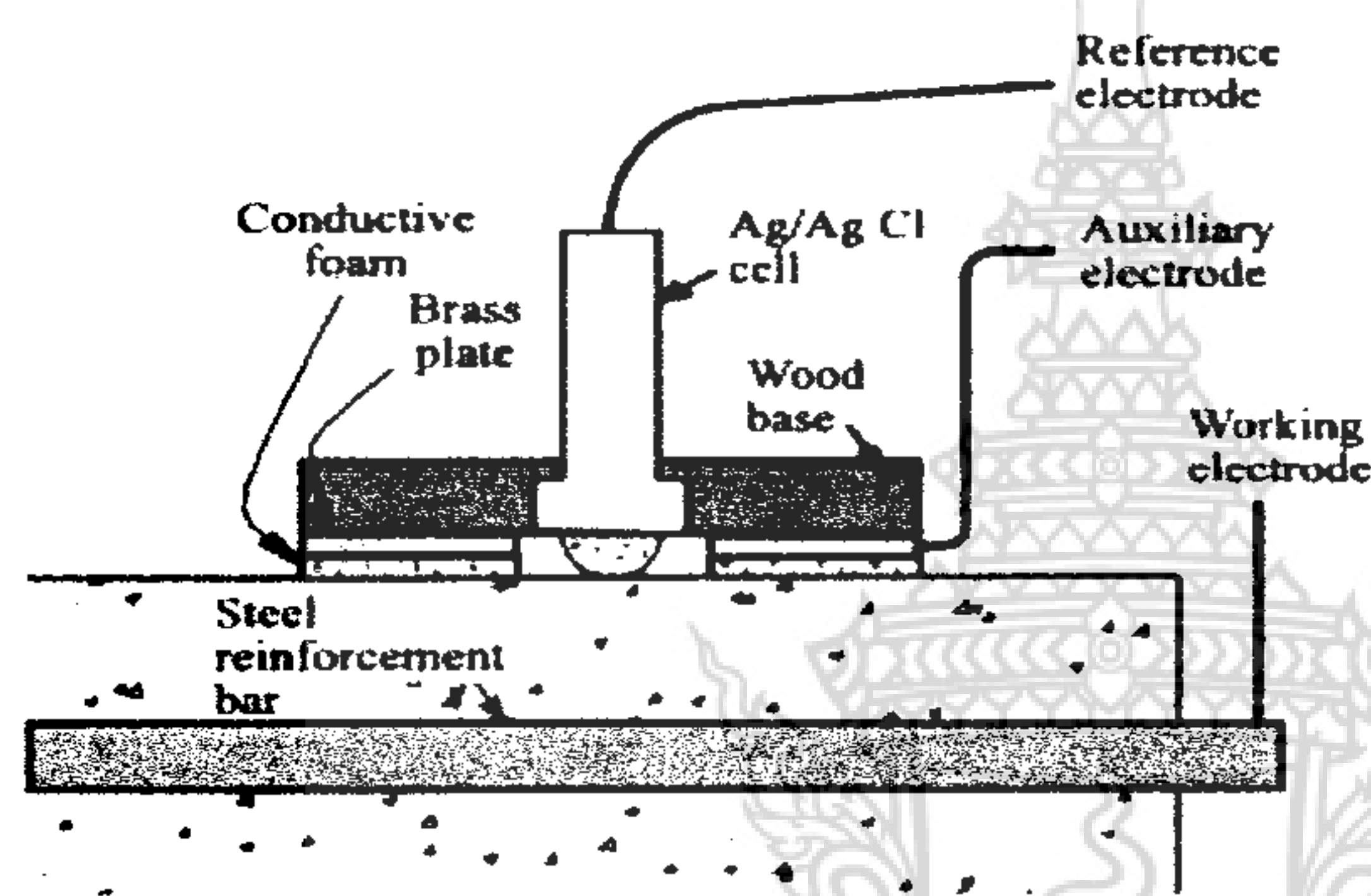
$$i_{\text{corr}} = \frac{I_{\text{corr}}}{A} \quad (3-5)$$

สิ่งที่ชี้ให้เห็นถึงกำลังของโครงสร้างที่เหลือนอยู่ทำได้โดยการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างด้วยวิธีการทดสอบของ LPR ซึ่งเป็นวิธีการที่มีลักษณะเฉพาะโดยการนำเอาขั้วไฟฟ้า (Electrode) ซึ่งเป็น



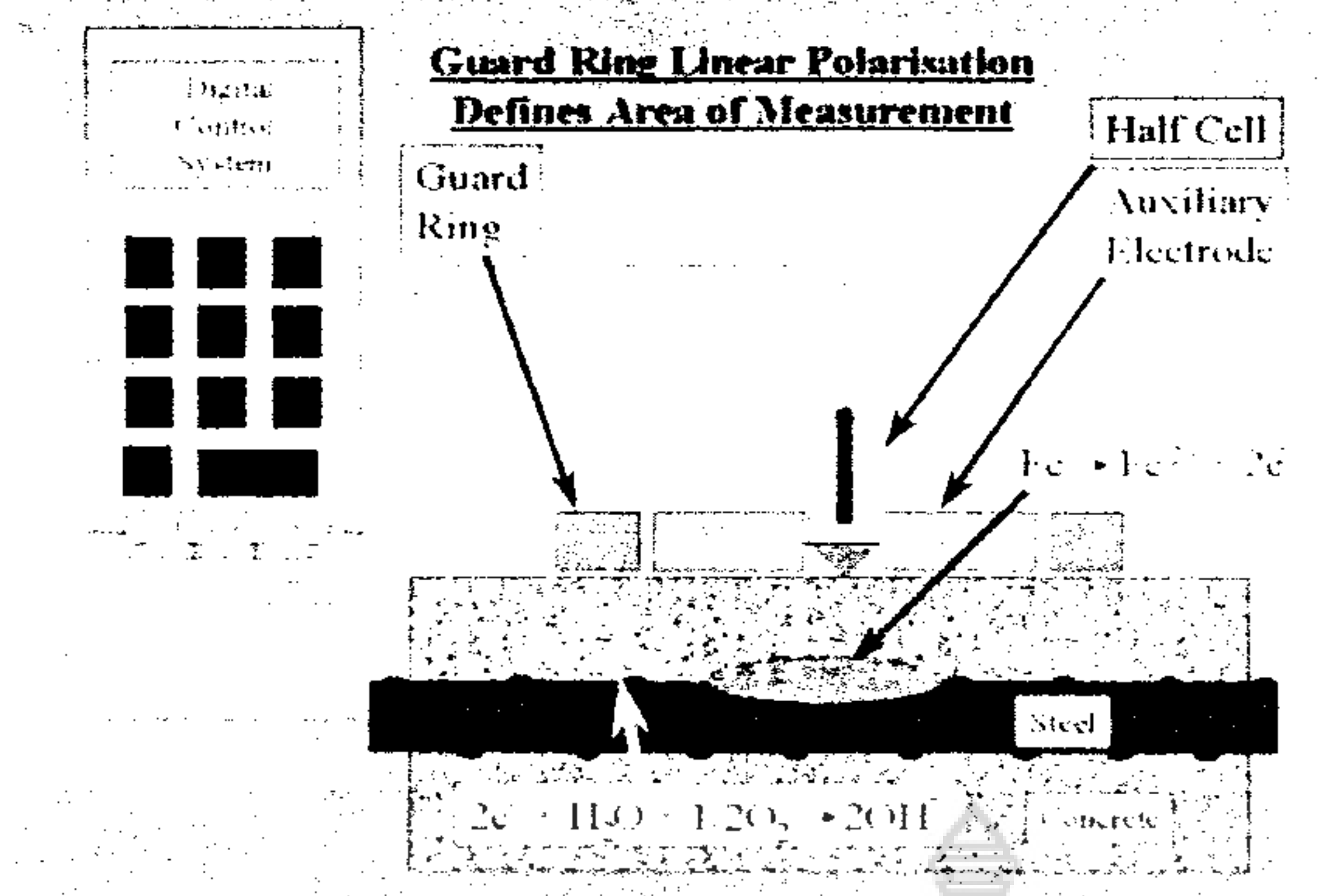
อุปกรณ์เสริมนำมาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยในการวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตให้ดีขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 16 เป็นการตั้งสมมุติฐานพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตให้อยู่ภายใต้ขั้วไฟฟ้า

อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ชัดเจนว่าการไหลของกระแสไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าไปยังพื้นผิวเหล็กเสริมซึ่งเป็นการส่งสัญญาณในลักษณะที่ไม่มีการจำกัดขอบเขตกระแสไฟฟ้าให้อยู่ภายใต้ขั้วไฟฟ้าส่งผลให้กระแสไฟฟ้าแพร่กระจายเกินออกไปทางด้านข้างซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ทราบโดยเฉพาะเหล็กเสริมที่มีพื้นที่ขนาดกว้างมาก (S. Feliu, J.A. Gonzalez, C. Andrade., et al., 1988) เป็นเหตุให้ได้ผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้องเพราะว่าพื้นผิวของเหล็กเสริมบริเวณที่โพลาไรซ์ (Polarized) ไม่ถูกต้องซึ่งทำให้การคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (i_{cor}) เกิดการผิดพลาดในขณะเดียวกันผลของการประเมินตรวจสอบ โครงสร้างจะไม่ถูกต้องด้วย



ภาพที่ 3-6 การวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ของเหล็กเสริมในคอนกรีต โดยไม่มี guard ring ที่มา : S.G. Milliard, D.W.Law. et al,(2001)

จากปัญหาของการส่งสัญญาณที่ไม่จำกัดขอบเขตสามารถแก้ไขได้โดยเพิ่มอุปกรณ์เสริมมีลักษณะเป็นวงแหวนล้อมรอบขั้วไฟฟ้าและ half-cell ซึ่งสามารถช่วยจำกัดขอบเขตการส่งสัญญาณของกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในขอบเขตซึ่งได้มีการพัฒนาโดย J.A. Gonzalez, S. Feliu, Jr, C. Andrade. And et al.1990 หลักการทำงานของ Guard ring ที่ล้อมรอบอยู่ภายนอกขั้วไฟฟ้าจะช่วยรักษาการกระจายของกระแสไฟฟ้าในระหว่างการวัดค่า LPR ให้อยู่ในขอบเขตของ Guard ring ซึ่งทำให้ได้ค่าของกระแสไฟฟ้ากระทำต่อพื้นผิวได้ค่าที่ถูกต้อง การจำกัดขอบเขตของกระแสไฟฟ้าให้อยู่ภายใน Guard ring เป็นการป้องกันสัญญาณรบกวนของกระแสไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายใน



ภาพที่ 3-7 การวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ด้วยการจำกัดขอบเขตการรับและส่งสัญญาณของกระแสไฟฟ้าจาก Guard ring ไปยังพื้นผิวของเหล็กเสริม
ที่มา S.G. Milliard, D.W.Law. et al, (2001)

3.4 การประเมินค่าแบบทาเฟล

เทคนิคการประเมินค่าของ Tafel extrapolation technique (TP) เป็นอีกวิธีการหนึ่งของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีใช้สำหรับคำนวณหาอัตราเกิดการเกิดสนิมบนหลักการพื้นฐานของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (I_{corr}) และความลาดชันทาเฟล (Tafel Slope) ดังนั้นค่าความลาดชันทาเฟลควรนำมาใช้ในการคำนวณหาอัตราเกิดการเกิดสนิม (C.Andrade, M.C. Alonso, J.A.Gonzalez, et al., 1990)

วิธีการระหว่าง LPR และ TP เป็นการประยุกต์ใช้จากหลักการพื้นฐานนี้เช่นการกำหนดค่าของกระแสไฟฟ้าให้มีความเสถียรอยู่ในระดับคงที่และอ่านค่าศักย์ไฟฟ้าซึ่งเป็นหลักการของกัลวานอสแตติก (Galvanostatic) หรืออีกวิธีการของ LPR จะกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าให้อยู่ในระดับคงที่และอ่านค่ากระแสไฟฟ้า (Current) เป็นหลักการของโพเทนทีโอสแตติก (Potentiostatic) ซึ่งทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันเช่น สำหรับวิธีของ LPR กำหนดให้ค่าของศักย์ไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงได้ไม่น้อยกว่า ± 25 มิลลิโวลต์ในขณะที่วิธีการของ TP ให้การเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นถึง ± 250 มิลลิโวลต์ ความแตกต่างระหว่างวิธีการ LPR และ TP คือการนำเอาผลที่ได้จากการทดสอบนำมาใช้คำนวณหาอัตราเกิดการเกิดสนิม ในกรณีที่ใช้วิธีการของ TP อัตราการเกิดสนิมหาได้จากการนำเอาค่า Tafel Slope (β_a และ β_c) มาแทนค่าลงในสมการที่ 3-6 เพื่อใช้คำนวณหากระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (i_{corr}) และคำนวณหาอัตราเกิดการเกิดสนิมได้จากสมการที่ 3-7

$$i = \{\exp[S_1(E-E_{corr})]-\exp[-S_2(E-E_{corr})]\} \quad (3-6)$$

- เมื่อ S_1 = ความลาดชันของแอนโอดิกบรานซ์ (anodic branch) มีค่าเท่ากับ $2.303/\beta_a$
 S_2 = ความลาดชันของของแคโทดิกบรานซ์ (cathodic branch) มีค่าเท่ากับ $2.303/\beta_c$



β_a = ค่าคงที่ของแอโนดิกทาเฟล (anodic Tafel constant)

β_c = ค่าคงที่ของแคโทดิกทาเฟล (cathodic Tafel constant)

E_{corr} = ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (Corrosion potential)

i_{corr} = กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (Corrosion current) ไมโครแอม

E = ศักย์ไฟฟ้า และ i = กระแสไฟฟ้า

$$\text{Corrosion Rate}(\mu\text{m/yr}) = \frac{0.129 I_{corr} EW}{dA} \quad (3-7)$$

- เมื่อ
- i_{corr} = ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
 - A = พื้นที่ผิวของเหล็กเสริมภายนอกที่เปิดเผย (ซม².)
 - $E.W.$ = น้ำหนักเทียบเท่าของเหล็ก
 - d = หน่วยน้ำหนักของเหล็กเสริม, กรัม/ซม³.

การคำนวณหาอัตราการเกิดสนิมของเหล็กโดยวิธี LPR เริ่มแรกต้องคำนวณหาค่า (I_{corr}) จากสมการที่ 16 ซึ่งใช้หลักการพื้นฐานของ Stern-Geary และหลังจากนั้นใช้สมการที่ 3-7 คำนวณหาค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็ก (M.Stern and A.L.Geary, et al,1957)

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 R_p (\beta_a \beta_c)} \quad (3-8)$$

เมื่อ R_p เป็นความต้านทานโพลาไรซ์ ($k\Omega \cdot \text{cm}^2$) และ β_a และ β_c เป็นค่าคงที่สามารถหาค่าได้จากความชันทาเฟล เพื่อให้การคำนวณทำได้ง่ายซึ่งได้กำหนดให้ค่าคงที่ของ $B = 26 \text{ mV}$ ได้มาจากผลงานวิจัย (C.Andrade and J.A. Gonzalez., et al., 1978) และเขียนได้ดังสมการที่ 17

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (3-9)$$

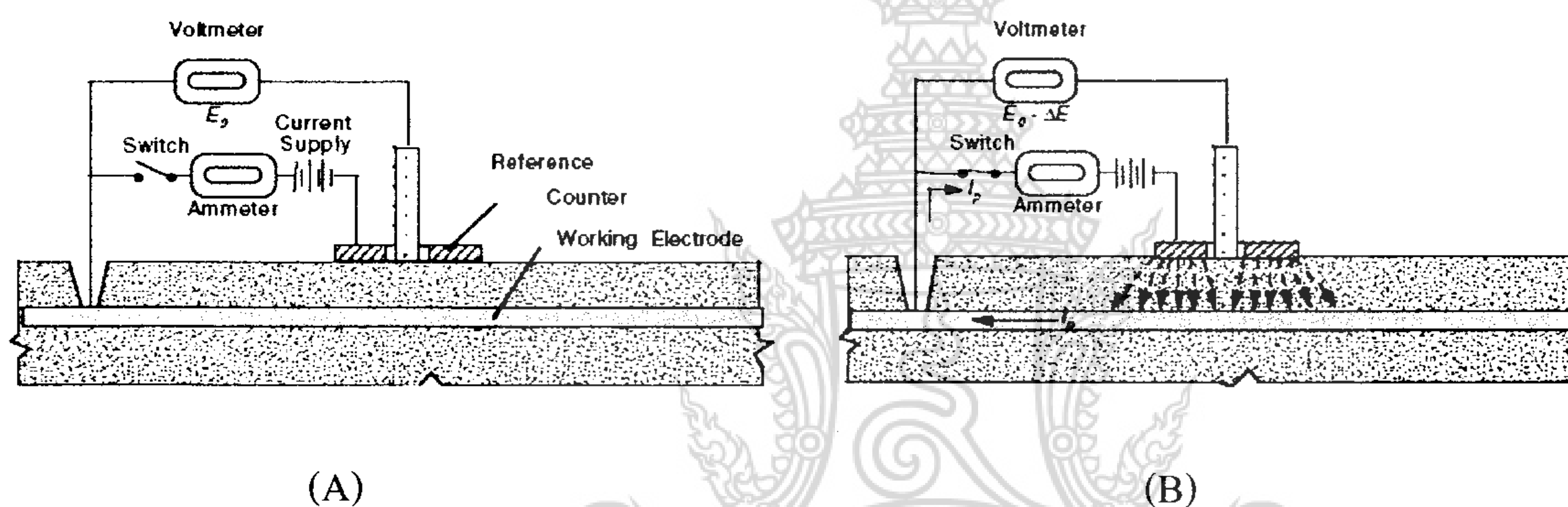
ข้อดีของวิธีการนี้

- แนวความคิดนี้อยู่ภายใต้เงื่อนไขของความถูกต้องในการประเมินค่าทาเฟลที่ให้ค่าเท่ากันหรือมากกว่าที่ทำโดยระเบียบวิธีการของ Weight Loss
- ความเป็นไปได้ในการวัดค่าด้วยเทคนิคนี้สามารถวัดค่าในภาวะสุดขีดของอัตราการเกิดสนิมที่มีค่าต่ำมากได้และสามารถใช้เป็นเครื่องบอกให้ทราบถึงการเกิดสนิมได้อย่างเป็นระบบต่อเนื่อง
- Tafel Plot สามารถเตรียมการวัดค่ากระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมได้โดยตรงซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดสนิม
- ค่าอัตราการเกิดสนิมสามารถหาได้อย่างรวดเร็วด้วยค่าของ Tafel Plot



3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทาน

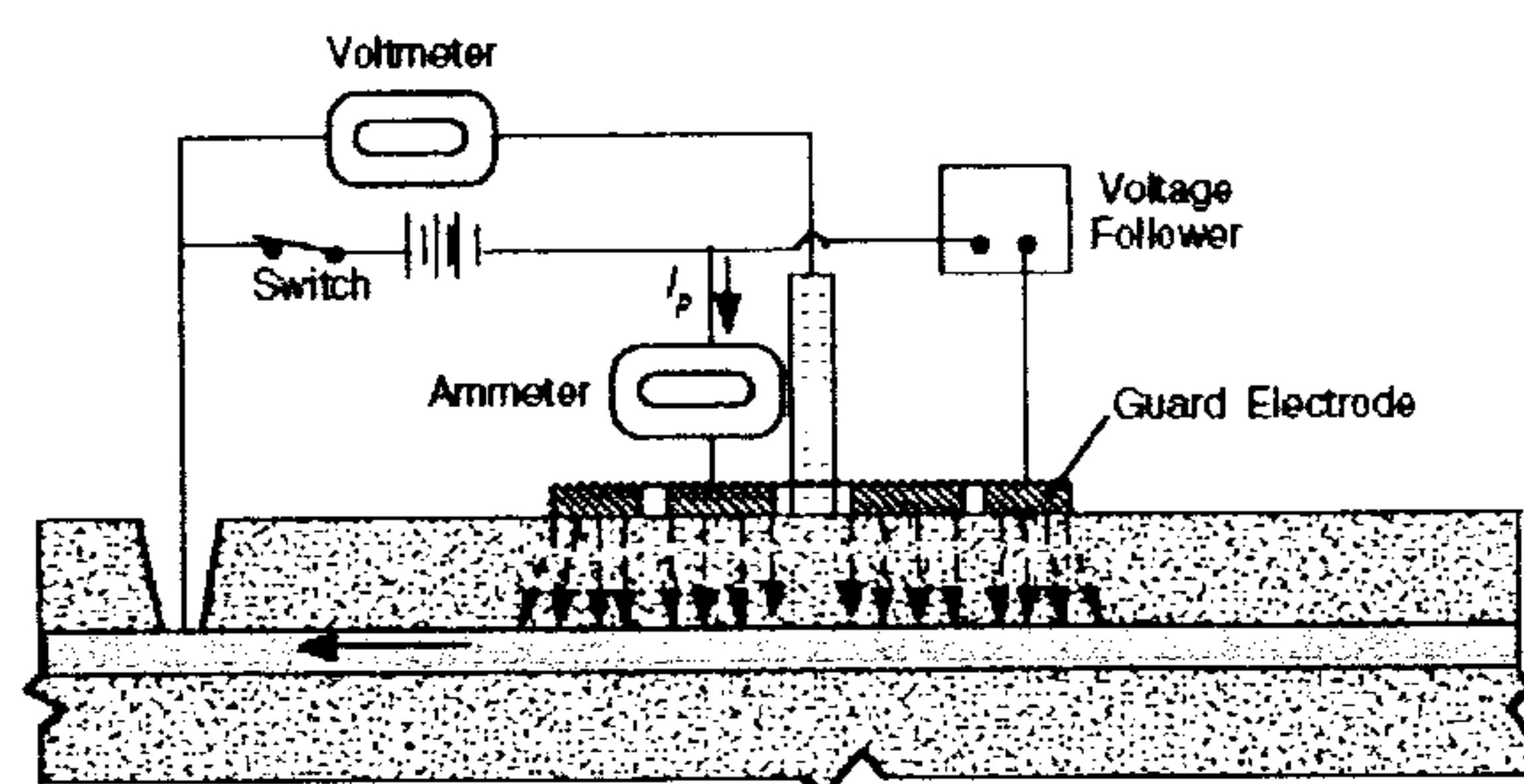
เครื่องมือพื้นฐานสำหรับวัดค่าความต้านทาน Polarization สำหรับเหล็กเสริมในคอนกรีต ประกอบด้วย 3 ขั้วไฟฟ้าตามรูปที่ 3-8 เป็นหลักการพื้นฐานทั่วไปที่นำมาใช้ในการอ้างอิงเป็น '3LP' device เพราะว่ามี 3 ขั้วไฟฟ้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode, RE) ขั้วไฟฟ้าใช้งาน เป็นเหล็กเสริม เรียกว่า (Working electrode, WE) และขั้วไฟฟ้าตอบสนอง (Counter electrode, CE) ทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า Polarization ไปยังที่เหล็กเสริมเป็นเครื่องมือเสริมที่ช่วยวัดค่าแรงดันและความแตกต่างกระแสไฟฟ้าในระหว่างการทดสอบ และเครื่องมือสามารถควบคุมใน Potentiostatic mode ซึ่งมีความแปรผันของกระแสไฟฟ้าก็จะช่วยรักษาความต่างศักย์ของ Working electrode (WE) ให้คงที่หรือจะใช้ galvanostatic mode ในการควบคุมค่าความต่างศักย์ที่แปรผันก็จะช่วยรักษาให้กระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่ จาก CE ไปยัง WE



ภาพที่ 3-8 วิธีการวัดค่าโพลาร์ไลต์เชิงเส้นกับการวัดค่ากระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม

ที่มา : (Escslante, E.,1989.,Clear,K.C.1989)

การคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลของกระแสไฟฟ้าตามที่กล่าวมานั้นยังเป็นค่าที่ไม่ถูกต้อง เนื่องจากแนวการไหลของกระแสไฟฟ้าที่อยู่ด้านใต้ของ Counter electrode (CE) ไม่ได้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด (Flis,J.,Sehgal, A.,Li,D.,Kho,Y.T, et al.,1992) การควบคุมที่ดีกว่าจะทำให้แนวการไหลของกระแสไฟฟ้าจาก CE ไปยัง WE ดีกว่า และได้มีการพัฒนาเครื่องมือซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้วไฟฟ้า เรียกว่า guard electrode หรือ auxiliary electrode ซึ่งจะมีตำแหน่งอยู่โดยรอบๆ CE (Feiu,S.,Gonzalez, J.A.,Andrade,C.,and Feliu,V.,1989) ดังรูปที่ 3-9 เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดอัตราการเกิดสนิมโดยใช้ guard electrode ซึ่งจะช่วยรักษาศักย์ไฟฟ้าเป็น CE จากผลลัพธ์ที่ได้นี้ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าจาก CE ไปยัง WE เป็นการไหลของกระแสไฟฟ้าอยู่ในขอบเขตภายใต้ CE สามารถนำเครื่องมือ 3LP ไปใช้ในการประเมินค่า Corrosion Rate ในโครงสร้างได้



ภาพที่ 3-9 เทคนิคโพลาร์ไรซ์เชิงเส้นตรงโดยใช้ guard electrode ในการจำกัดกระแสไฟฟ้าจากตัว

จ่ายกระแสไฟฟ้า CE ให้อยู่ภายในบริเวณ GE

ที่มา : (Escslante, E.,1989.,Clear,K.C.1989)

ข้อจำกัดของการวัดค่าความต้านทาน

การวัดอัตราการเกิดสนิมโดยใช้ความต้านทานโพลาร์ไรซ์แสดงอยู่ในรูปของเวลาในขณะที่ทดสอบ การวัดอัตราการเกิดสนิมจะเป็นจุดพิเศษโดยเฉพาะในโครงสร้างที่คาดหวังไว้ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่หลากหลายเช่น ปริมาณความชื้นและ Oxygen ที่ยังมีอยู่ในคอนกรีตและอุณหภูมิ (Clemena et al.) ได้นำเสนอไว้หลายวิธีที่จะใช้ ทำนายอายุการใช้งานของคอนกรีตเสริมเหล็กในอนาคต

- ใช้ค่ามากที่สุดจากการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมในการประมาณอายุการใช้งานที่เหลืออยู่
- ใช้ค่าเฉลี่ยของอัตราการเกิดสนิมในบริเวณตำแหน่งที่เกิดสนิมรุนแรงที่สุดในโครงสร้าง
- ใช้ค่าต่ำสุดและสูงสุดของอัตราการเกิดสนิมในการประเมินค่าช่วงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่

การคำนวณค่าอัตราการเกิดสนิมจากความต้านทานโพลาร์ไรซ์โดยใช้ค่าคงที่ $B = 26 \text{ mV}$ เป็นค่าที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมซึ่งมีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาแอโนดิกและปฏิกิริยาแคโทดิก (Feliu et al.) ในช่วงเวลานี้ไม่มีการจัดทำมาตรฐานที่อธิบายการวัดค่าอัตราการเกิดสนิม ซึ่งค่าอัตราการเกิดสนิมที่ได้หาได้จากวิธีการที่แตกต่างกันและผลที่ได้ก็มีค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นในปัจจุบันมีแนวทางที่เป็นข้อกำหนดของวิธีการทดสอบบนพื้นฐานของประสบการณ์จากห้องทดลองและการทดสอบในสนาม ได้อธิบายการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมโดยใช้ อุปกรณ์เสริมคือ guard electrode (GE) (Andrade.,C.,and Alonso,C.,et al.)

3.6 วิธีการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ในการที่จะตรวจสอบและประเมินค่าของ Corrosion Rate เป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการที่จะกำหนด Polarized Area ของเหล็กเสริม และสามารถที่จะทำให้การวัดค่า Corrosion Rate มีประสิทธิภาพได้โดยการใช้ guard electrode (GE) สำหรับใช้กำหนดขอบเขตของกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในขอบเขตที่จำกัด สำหรับตำแหน่งของ GE จะอยู่รอบๆแกนกลางของ CE และเป็นการรักษาสภาพศักย์ไฟฟ้า เป็นผลให้การกระจายของสัญญาณจาก CE อยู่



ในขอบเขตที่จำกัดมีพื้นที่ไม่มากกว่าจากจุดกึ่งกลางที่มีการแบ่งแยกเป็นสองส่วนระหว่าง CE และ GE เมื่อทั้งคู่เป็น electrode ที่มีความกว้างที่เท่ากันและภายใต้สมมุติฐานว่าคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่เหมือนกัน

วิธีการของเครื่องมือ GECOR 6 มีอุปกรณ์ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่วัดค่าการกัดกร่อนและ Probe ในส่วนของ Probe จะมี 2 ส่วนที่เป็นขั้ว (Electrode) รับและส่งสัญญาณ และ CE ซึ่งอยู่ภายนอก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 140 มม. ใช้สำหรับ Current Confinement ในการวัดค่า Corrosion Potential จะใช้ Solid Silver/Silver Chloride เป็นขั้วอ้างอิงอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของ Probe ซึ่งค่าความต่างศักย์ทุกๆค่า จะอยู่ระหว่างขั้ว (Electrode) ทั้งสองและมีกระแสไฟฟ้าจาก CE ที่อยู่ตรงกึ่งกลางของ Probe จะเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ระหว่างขั้วรับส่งสัญญาณทั้งสอง เป็นขบวนการที่มีประสิทธิภาพในการจำกัดขอบเขตของกระแสไฟฟ้ากับพื้นที่ที่อยู่ด้านล่างตรงกันกับ CE ค่าที่วัดได้เป็นค่าที่ถูกต้องนำไปใช้ในการคำนวณหาค่า Polarization Resistance. เครื่องมือนี้ได้พัฒนาในประเทศสเปนผลิตและจำหน่ายใน Illinois โดย GECOR 6

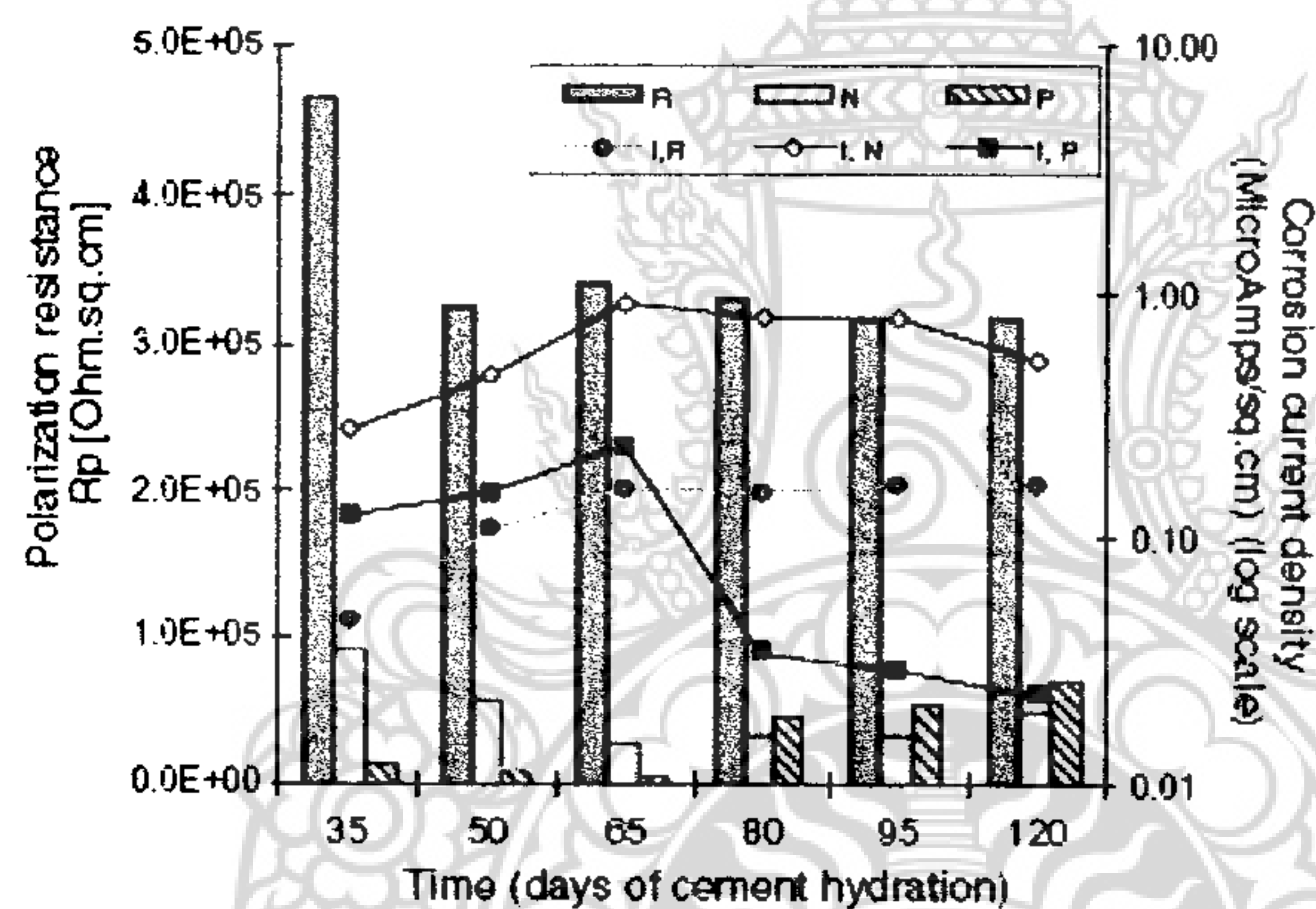
วิธีการของเครื่องมือ 3LP-NBS1 ประกอบไปด้วย Three-Electrode Linear Polarization Technique ใช้สำหรับวัดค่าความต้านทาน (Clear, K.C.1989) การเคลื่อนที่ขึ้นลงของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบจนกระทั่งเหล็กเป็น Cathodically Polarized ที่ 12 Volte ในระหว่างขบวนการนี้จะใช้การไหลของกระแสไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 4, 8 และ 12 mV เป็นค่าที่บันทึกไว้ และ Probe มีส่วนประกอบของ Pencil Copper/Copper Sulfate เป็น Reference Electrode และมีแท่งทองแดงเป็นแกนกลางอยู่ใน Probe มีความยาว 17.1 ซม. และไม่มีอุปกรณ์ guard electrode

วิธีการของเครื่องมือ CORROATCH (NSC) ใช้หลักการควบคุมโดยใช้ galvanostatic double pulse เป็นการให้ 2 ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่มีช่วงจังหวะของการเดินที่แตกต่างกันเป็นส่วนที่ช่วยเสริมการจัดเตรียมความถี่ที่มีค่าสูงมากสำหรับใช้วัดค่าความต้านทานของคอนกรีต (R_s) การวัดค่าโดยใช้ความถี่ที่ต่ำกว่าในการวัดค่าเป็นการรวมความต้านทานของคอนกรีต (R_s) และ Polarization Resistance (R_p) ดังนั้นในความแตกต่างกันระหว่างการจัดเตรียมทั้งสองของ (R_p) ซึ่งสามารถที่จะคำนวณหากระแสของการกัดกร่อนและอัตราของการกัดกร่อนได้ เทคนิคที่ใช้จะแตกต่างจาก AC Impedance Technique ความถี่จะไม่ขึ้นลงอย่างรวดเร็ว แต่จะใช้สองความถี่เท่านั้น ความถี่ที่ใช้ในการควบคุมอาจจัดทำขึ้นมาให้เป็นแบบอัตโนมัติที่ความถี่ 1300 และ 0.02 Hz สำหรับค่าความถี่ที่ต่ำมากสามารถที่จะเลือกเป็น 1 mHz ซึ่งค่าอาจจะต่ำไม่เพียงพอที่จะใช้ในการวัดค่า (R_p) ในสถานะ Passive State และสำหรับ Probe จะประกอบด้วยแกนกลางเป็น Silver/Silver Chloride Reference electrode และแกนกลางเป็น Platinum Counter electrode (CE) และ guard electrode (GE) ซึ่ง (CE) และ (GE) จะช่วยรักษาค่าความเป็นศักย์ไฟฟ้าให้เท่ากันโดยการให้แรงดันไฟฟ้า

วิธีการของเครื่องมือ PR Monitor เป็นเครื่องมือที่ใช้หาค่า Corrosion Rate ของเหล็กที่พัฒนาหลังจากสามวิธีการแรกโดยมีการตรวจสอบและประเมินจาก SHRP ใช้หลักการพื้นฐานที่เหมือนกันกับวิธีของ GECOR6 device มีอุปกรณ์ภายนอกเป็น guard electrode (CE) ซึ่งช่วยในการ Confinement Current ให้มีค่าสม่ำเสมอ ผลิตและจำหน่ายโดยบริษัท Cortest Instrument Systems in Texas



D.A.Koleva. et al. ได้ศึกษาและวิจัยการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในมอร์ต้ารูปทรงกระบอกโดยใช้วิธีการของ LPR และ EIS ในการวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ (Polarization Resistance, Rp) เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าประกอบด้วย Potentiostat PGSTAT30, combined with FRA2 module, using GPES and FRA software package จากการศึกษาวิจัยนี้ได้แบ่งตัวอย่างทดสอบเป็นสามกลุ่ม โดยกลุ่ม N = Freely Corroding กลุ่ม P = Cathodic Protection และกลุ่ม R = Reference specimen ผลจากการวัดค่าทางไฟฟ้าเคมีโดยวิธี LPR จากภาพที่ 3-10 พบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{corr}) ของตัวอย่างกลุ่ม N จะเกิดสนิมสูงมากหลังจาก 65 วัน เพราะว่า (i_{corr}) มีค่าเข้าใกล้ $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ และสำหรับตัวอย่างกลุ่ม P ค่า (i_{corr}) ลดเพียงลงในช่วงเวลา 65-80 วันและลดลงต่ำสุดที่ $0.03 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ซึ่งหมายความว่ากลุ่มตัวอย่าง P มีการป้องกันปฏิกิริยาที่ช้าลงจะเกิดสนิมได้ยากกว่ากลุ่ม N และสำหรับค่าความต้านทาน Polarization (Rp) วัดค่าโดยวิธี EIS จากภาพที่ 3-11 พบว่าตัวอย่างกลุ่ม P แนวโน้มทั่วไปของความต้านทาน (Rp) มีค่าเพิ่มขึ้น และในกลุ่มตัวอย่าง N แนวโน้มทั่วไปของความต้านทาน (Rp) มีค่าลดลง สรุปได้ว่าตัวอย่างทดสอบที่มีการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาที่ช้าลงจะมีอัตราการเกิดสนิมได้น้อยกว่า

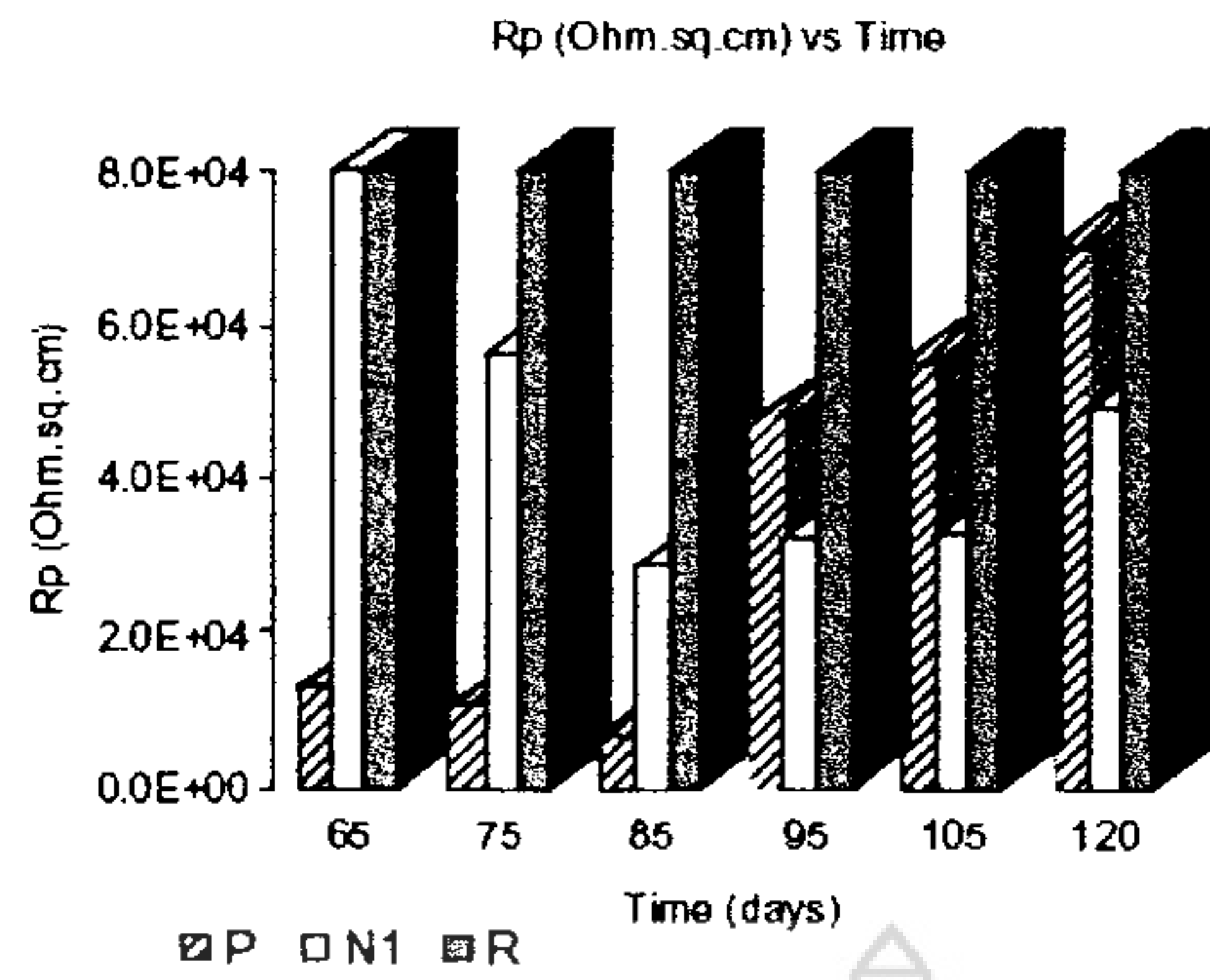


ภาพที่ 3-10 การเปรียบเทียบความต้านทาน Polarization (Rp) โดยวิธี LPR

ที่มา : D.A.Koleva,J.Hu, et al, (2006)

Ha-Won Song and Velu Saraswathy., (2007) ได้ศึกษาและวิจัยพบว่าค่าการหาค่าของพื้นที่โพลาไรซ์รอบเหล็กเสริมหากได้ค่าที่มีความผิดพลาดก็จะทำให้ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{corr}) ที่คำนวณได้มีค่าผิดพลาดซึ่งจะส่งผลกระทบให้การประเมินค่าอัตราการเกิดสนิมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กผิดพลาดไปด้วย ดังนั้นต้องทำการกำหนดขอบเขตพื้นที่ของกระแสไฟฟ้ารอบเหล็กเสริม โดยใช้อุปกรณ์ช่วยเป็น guard electrode (GE) ให้ทำหน้าที่จำกัดขอบเขตของการไหลกระแสไฟฟ้าและแรงดันให้มีความเสถียรทำให้ได้ค่าอัตราการเกิดสนิมที่ถูกต้องดังรูปที่ 3-10 อย่างไรก็ตามปัจจัยอย่างหนึ่งที่มีผลกระทบต่อค่า polarization area และ (i_{corr}) คือความหนาของคอนกรีตที่ระยะหุ้มของเหล็กเสริม (J.Flis et al.,1998) สรุปว่าหาก polarization area มีค่าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้ามีความเสถียร จากวิธีการดังกล่าวได้มีผลงานวิจัยในห้องทดลองให้ข้อมูลไว้เพื่อเป็นบรรทัดฐานในการพิจารณาสภาพการเกิดสนิมตามตารางที่ 3-3





ภาพที่ 3-11 การเปรียบเทียบความต้านทาน Polarization (Rp) โดยวิธี EIS
ที่มา : D.A.Koleva, J.Hu, et al, (2006)

ตารางที่ 3-3 กระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม เปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

อัตราการเกิดสนิม (I_{corr})	เงื่อนไขสถานะของเหล็กเสริม
$I_{corr} < 0.1 \mu A/cm^2$	สถานะยังไม่เกิดสนิม
$I_{corr} 0.1-0.5 \mu A/cm^2$	อัตราการเกิดสนิมต่ำถึงปานกลาง
$I_{corr} 0.5-1.0 \mu A/cm^2$	อัตราการเกิดสนิมปานกลางถึงสูง
$I_{corr} > 1.0 \mu A/cm^2$	อัตราการเกิดสนิมสูง
วิธีการของเครื่องมือที่ไม่มี Guard Electrode	
$I_{corr} < 0.2 \mu A/cm^2$	สถานะที่ไม่เกิดสนิม
$I_{corr} 0.2-1.0 \mu A/cm^2$	มีโอกาสเกิดสนิมที่ 10-15 ปี
$I_{corr} 1.0-10 \mu A/cm^2$	มีโอกาสเกิดสนิมที่ 2-10 ปี
$I_{corr} > 10 \mu A/cm^2$	มีโอกาสเกิดสนิมที่ 2 ปีหรือน้อยกว่า

ที่มา : (C.Andrade, M.C.Alonso. et al,1990)

3.7 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความต้านทานโพลาไรเซชัน

เทคนิคที่ใช้วัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นความสัมพันธ์ของ Stern-Geary ใช้สำหรับการพิจารณาทดสอบแบบไม่ทำลายหาค่าอัตราการเกิดสนิม ดังสมการ (3-10)

$$i_{corr} = B/R \tag{3-10}$$

เมื่อ $B =$ ค่าคงที่

$R_p =$ Polarization Resistance ได้มาจากการทดลอง

ค่าของ R_p ที่ถูกต้องขึ้นอยู่กับพื้นผิวสัมผัสที่ดีเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าระหว่างพื้นผิวของคอนกรีตกับ Probe สำหรับที่จุดเชื่อมต่อกับพื้นผิวสัมผัสของคอนกรีตไม่ดีค่า R_p จะไม่แน่นอนทำให้ค่าของกระแสไฟตกต่ำลง



(IR drop) ซึ่งทำให้ผลที่ได้ไม่มีความน่าเชื่อถือ จากการตรวจสอบความถูกต้องถึงผลกระทบบริเวณผิวสัมผัสของคอนกรีตในสภาพที่แห้ง เปียก และ paste ได้รายงานไว้ในตารางที่ 3-4

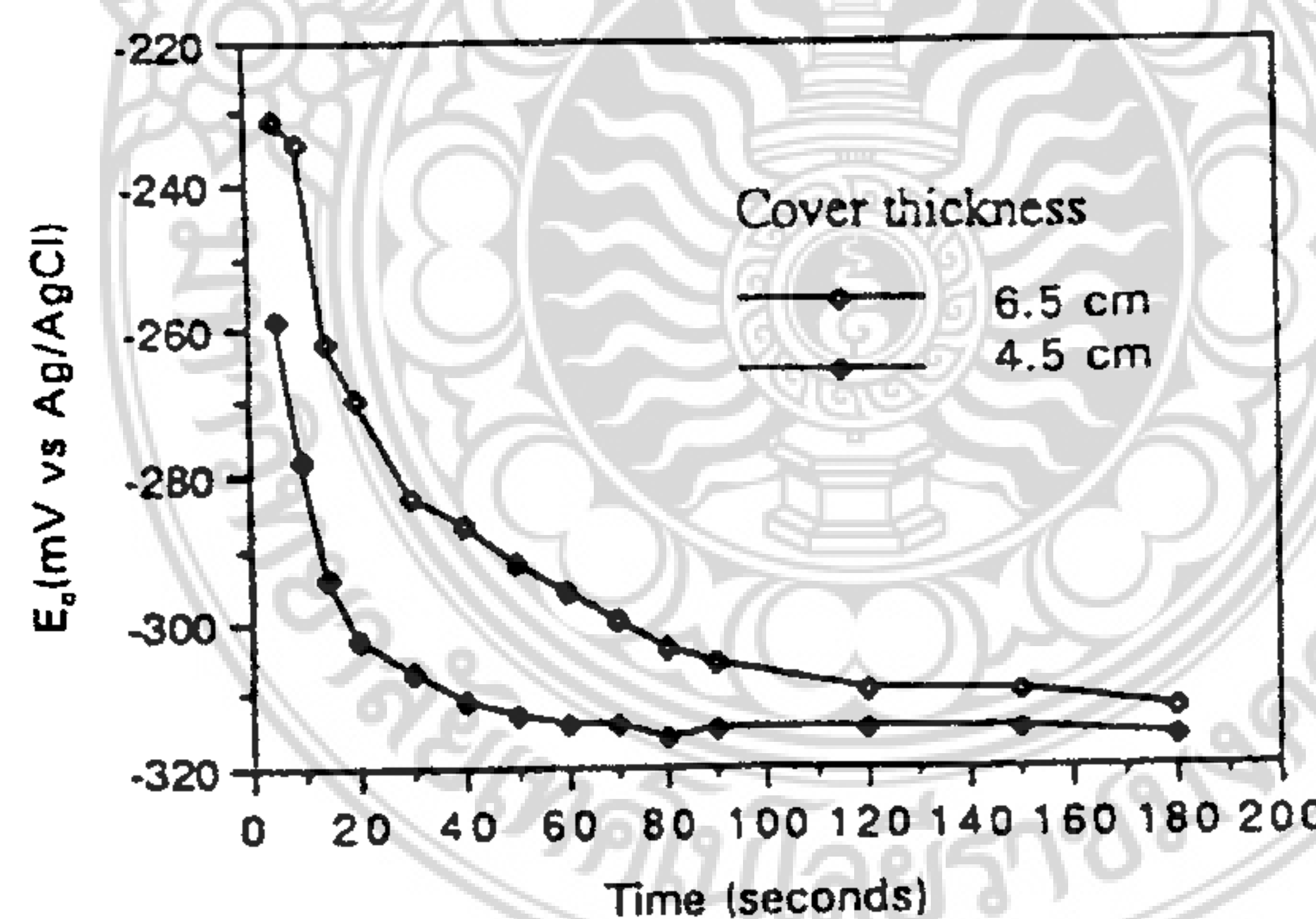
ตารางที่ 3-4 ค่าความต้านทานโพลาไรซ์ (R_p) ด้วยเครื่องมือ NSC device, ตัวอย่างมอดาร์ขนาดเล็ก

Specimen	R_p ($K\Omega.cm^2$)		
	Dry	Wet	Paste
1	1.55	3.65	3.01
2	1.50	3.64	-
3	1.30	3.10	2.78

ที่มา : (Aquisioic, Parker Laboratories Ins.)

จากตารางที่ 3-4 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของสภาพคอนกรีตต่อค่า R_p ที่วัดได้โดยใช้เครื่องมือ NSC device ค่าของ R_p ที่ทำได้ โดยการใช้ น้ำหรือ Paste เป็นตัวนำจะให้ค่าของ R_p มากกว่าสภาพคอนกรีตที่แห้งและจะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่มีสภาพเป็น Paste และ dry ค่า R_p ที่วัดได้จะต่ำกว่าสภาพที่เปียกและในกรณีพื้นผิวคอนกรีตที่เรียบการกระจายของกระแสไฟฟ้าจะดีกว่าผิวสัมผัสที่ขรุขระ

ค่าของ R_p ที่วัดได้ในสภาพพื้นผิวสัมผัสที่แห้งพบว่าไม่สามารถนำค่า R_p ไปใช้ต่อได้เนื่องจากมีการกระจายของข้อมูลจำนวนมาก แต่ภายหลังจากที่ผิวสัมผัสของตัวอย่างทดสอบมีความเปียกขึ้นค่าของศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม Corrosion Potential (E_c) มีการเปลี่ยนแปลงแสดงได้ดังภาพที่ 3-12



รูปที่ 3-12 การเปลี่ยนแปลงของ Corrosion Potential ภายหลังจากพื้นผิวคอนกรีตมีความเปียกขึ้น.

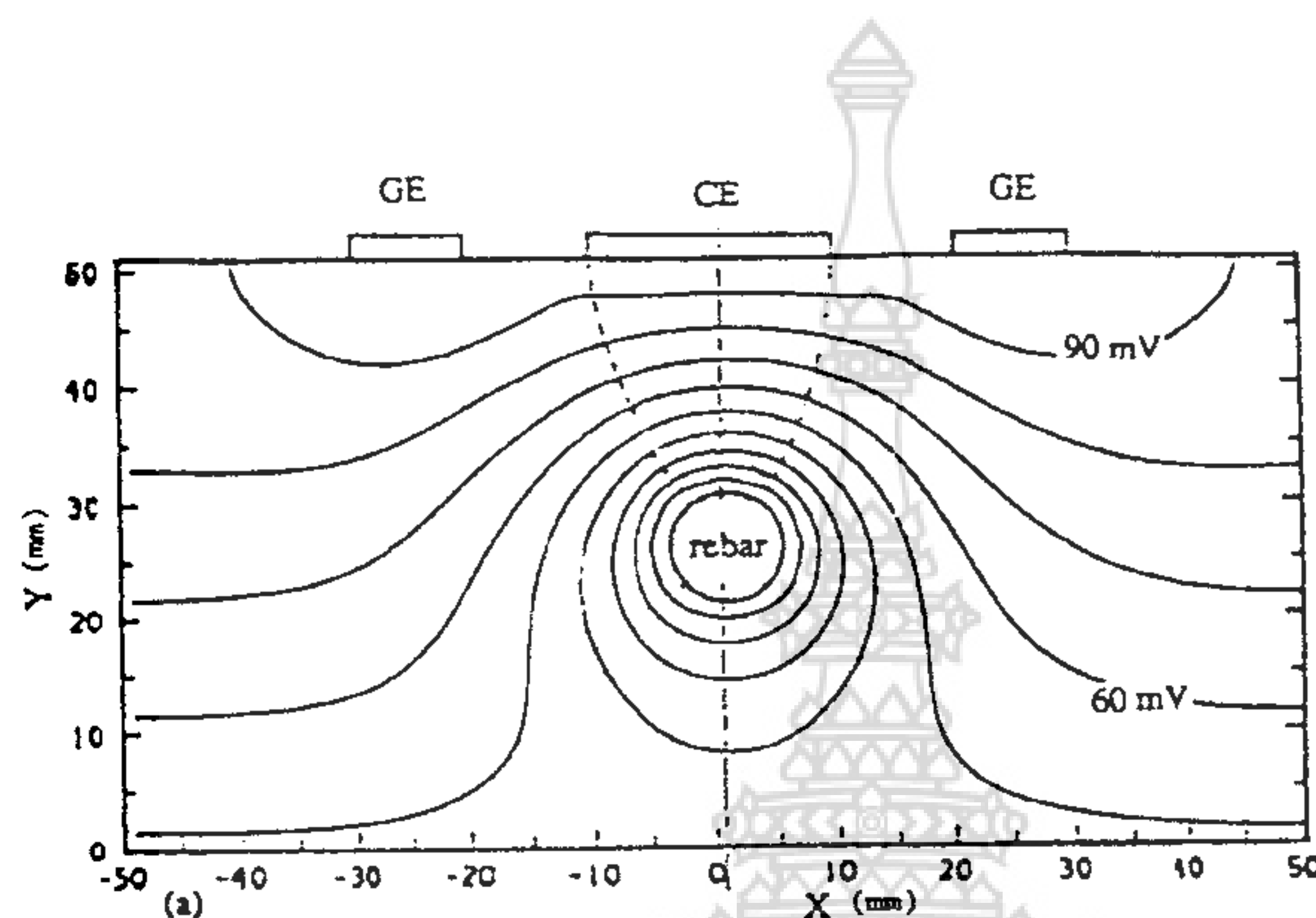
ที่มา : SHAP-S-324

ผิวคอนกรีตที่เปียกขึ้นค่าศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นมากกว่าเนื่องจากการซึมผ่านที่ดีของน้ำที่ผิวของคอนกรีต ซึ่งอธิบายได้ว่าความต้องการ Oxygen สำหรับไว้ทำปฏิกิริยาที่ขั้วลบจะเป็นการทำให้เกิดการซึมผ่านของ Oxygen อย่างเป็นระบบในช่องว่างของคอนกรีต ซึ่งค่า Potential ที่มีค่าที่เป็นลบมากกว่าจะทำให้ปริมาณ

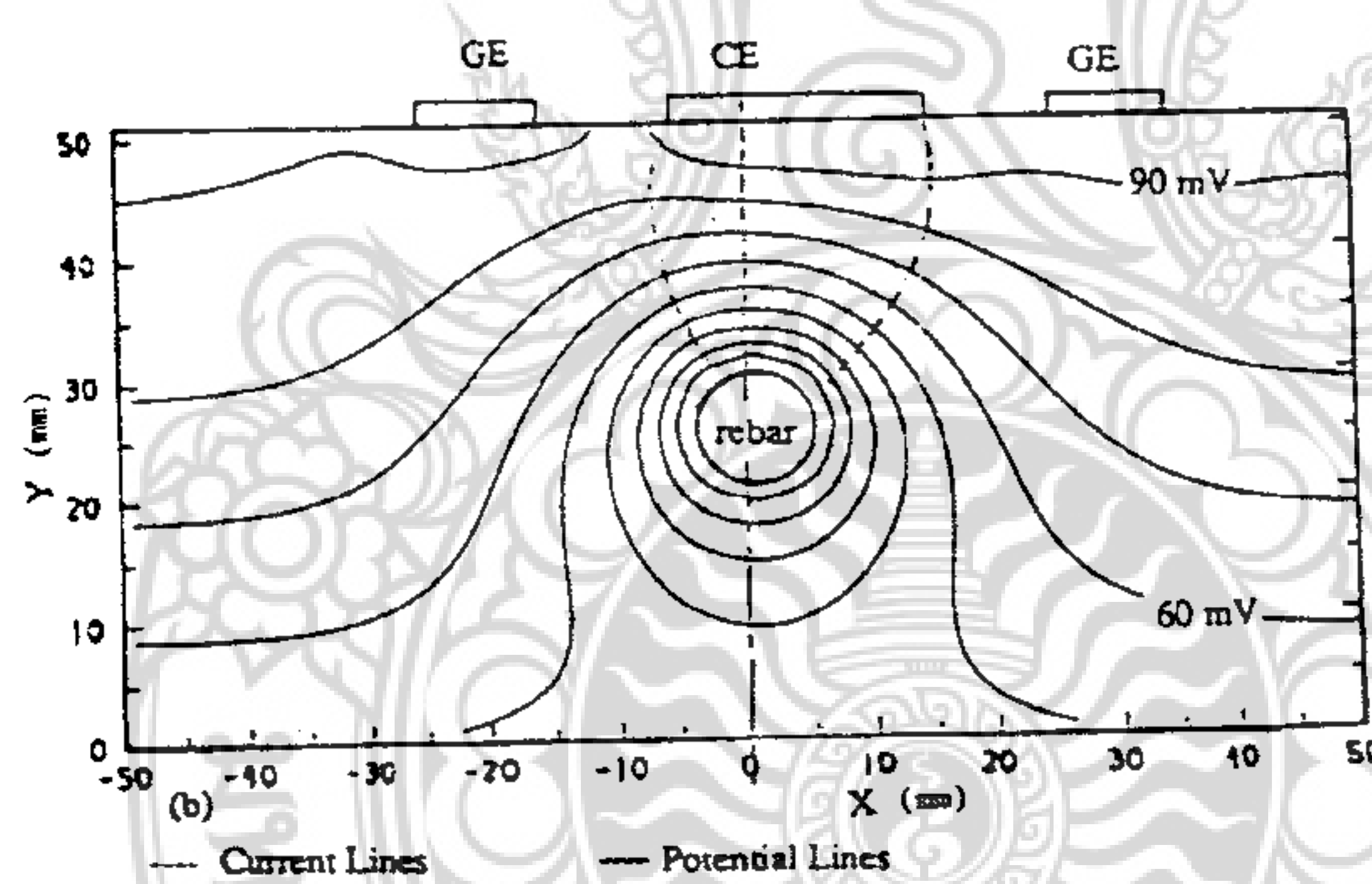


Oxygen มีค่าลดลงก็จะส่งผลให้ค่า Potential มีค่าสูงขึ้นไปอีกจนถึง -200 mv (Tamura, M.,M.nagayama, and K.Shimosawa.)

และจากรูปที่ 3.12 แสดงให้เห็นถึงช่วงระยะเวลาที่นานค่าศักย์ไฟฟ้าจะมีความเสถียรมาก โดยที่ระยะหุ้มคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น ต่อจากนั้นจะสังเกตได้ว่าช่วงเวลาที่ศักย์ไฟฟ้ามีความเสถียร จะขึ้นอยู่กับสภาพของคอนกรีต ถ้าคอนกรีตแห้งจะมีความต้านทานสูงทำให้ค่า (E_c) จะมีความเสถียร เมื่อมีปริมาณความชื้นในคอนกรีตมากกว่าดังเช่นตัวอย่างคอนกรีตทดสอบที่แช่อยู่ในน้ำคอนกรีตจะมีความต้านทานต่ำ



(A) ตำแหน่งของ Probe มีความสมดุลอยู่เหนือเหล็กเสริม



(B) ตำแหน่งของ Probe เคลื่อนย้ายจากตำแหน่งตรงกลางของเหล็กเสริม

ภาพที่ 3.13 ตำแหน่งของ Probe ที่มีผลกระทบต่อ การกระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในคอนกรีต
ที่มา: SHAP-S-324

จากรูปที่ 3.13 แสดงถึงการจำลองรูปแบบการไหลของกระแสไฟฟ้าและการกระจายของศักย์ไฟฟ้าเป็นตัวอย่างที่กำหนดให้ตำแหน่งของเหล็กเสริมอยู่ตรงกลางภายใต้ Probe ซึ่งจะทำให้ค่า Potential ที่มีความเสถียรมาก และเมื่อมีการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของ Probe จากจุดตรงกลางของเหล็กเสริมจะมีผลทำให้ Polarized area รอบๆเหล็กเสริมมีการเบี่ยงเบนกว้างมากขึ้น ดังรูปที่ 23 (A) และ (B) สัดส่วนของ Polarized area

โดยรอบเหล็กเสริมตามรูปที่ 3.13 (A) จะมีขนาดที่มากกว่า รูปที่ 23 (B) และรูปแบบนี้จะเป็นการตรวจสอบที่มีความถูกต้องในการวัดค่าของ R_p ทำได้โดยใช้เครื่องมือ NSC device ในการวัดค่า R_p แสดงผลในตารางที่ 3-4 เมื่อมีการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของ Probe จะมีผลทำให้ค่า R_p ลดลงซึ่งจะมีผลทำให้ Polarized area เพิ่มขึ้น โดยที่เหล็กเป็นวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าอยู่ในคอนกรีตที่มีความต้านทานสูงและเป็นขนาดที่จำกัดตำแหน่งของ Probe ที่มีความแตกต่างกันจะให้ผลในการกระจายของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3-13(B) ซึ่งเป็นรูปแบบที่ไม่ดีในการไหลของกระแสไฟฟ้าในส่วนของงานที่จะนำค่า R_p ไปใช้ในการคำนวณหาอัตราการเกิดสนิม

ตารางที่ 3.5 ผลกระทบจากการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของ Probe ต่อการวัดค่า R_p โดยใช้เครื่องมือ NSC Device กับจำนวนคอนกรีตหลายตัวอย่าง

Measurement Site	R_p ($k\Omega \cdot cm^2$)	
	Symmetrical ^b	Displaced ^c
A	48.35	40.27
B	64.33	52.39
C	74.61	49.46
D	41.32	29.38

^aAverage of three result report. ^bProbe centered symmetrically over rebar. ^cProbe Displaced 0.5 cm(0.2in.) from the rebar center.

ที่มา : SHAP-S-324

3.8 พื้นที่สนามไฟฟ้า

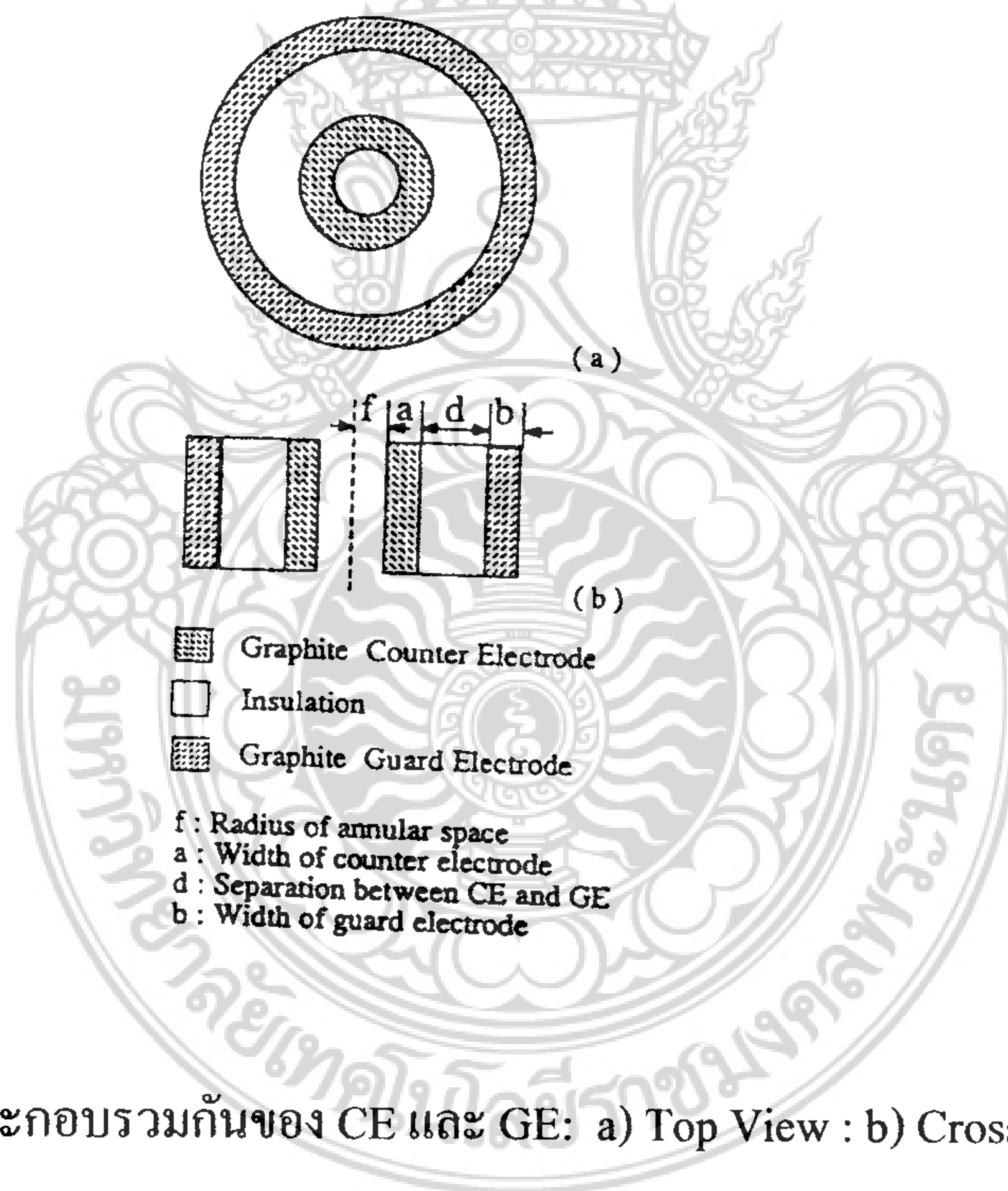
จากความสัมพันธ์ของ Stern-Geary เป็นวิธีการที่ใช้ทดสอบแบบไม่ทำลายซึ่งใช้สำหรับหาค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (Andrade,C.andJ.A.Gaonzalez.,1987) อย่างไรก็ตามในโครงสร้างคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมในปริมาณมากและเป็นไปไม่ได้ที่ CE จะสามารถ Polarized area ของผิวของเหล็กเสริมได้ทั้งหมด เพราะว่า CE จะทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณกระแสไฟฟ้าไปยังเหล็กเสริม (WE) ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้ว CE จะมีพื้นที่ในการส่งสัญญาณกระแสไฟฟ้าได้น้อยกว่า WE มาก ส่งผลให้การกระจายของสัญญาณที่อยู่เหนือเหล็กเสริมเป็นแบบไม่สม่ำเสมอและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ส่งสัญญาณไปก็จะลดลงและหายไปที่สุดเมื่อ CE มีการเคลื่อนย้ายตำแหน่ง ดังนั้นการกระจายการส่งสัญญาณของกระแสไฟฟ้าจะเป็นแบบไม่สม่ำเสมอและขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ เช่นตำแหน่งของเหล็กเสริม (มีกระแสไฟฟ้าไม่มีความเสถียรและจะมีการกระจายอย่างมากสำหรับเหล็กเสริมที่ยังไม่เกิดสนิม) ค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต (สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ส่งไปยังเหล็กเสริมจะไม่มีเสถียรเป็นอย่างมากในคอนกรีตที่มีความต้านทานต่ำ) ขนาดของ CE ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าของ R_p ที่วัดได้ขึ้นอยู่กับ การกระจายของกระแสไฟที่เกิดขึ้นจริง (Feliu, S., J.A.



Gonzalez.,1990) และการเลือกใช้คลื่นความถี่ เช่นถ้าพื้นที่ของ WE มีมากกว่า พื้นที่ของ CE ค่า Polarized area ขึ้นอยู่กับการรบกวนของคลื่น (Polarized area มีค่าเพิ่มขึ้นการรบกวนของคลื่นจะมีค่าลดลง) (Macdonald,D.,1988)

คำจำกัดความของ Polarized area ของเหล็กระหว่างการวัดค่าซึ่งจะมีข้อรับส่งสัญญาณของกระแสไฟฟ้า 2 ขั้ว โดยที่ GE จะอยู่โดยรอบแกนกลางของ CE ซึ่งทำหน้าที่รักษาสภาพศักย์ทางไฟฟ้าไม่ให้กระจายออกไปเกินขอบเขต ผลของการกระจายของสัญญาณไฟฟ้าจาก CE จะอยู่ภายในขอบเขตซึ่งเป็นส่วนที่แยกกันระหว่าง CE และ GE เมื่อทั้งสองขั้วมีขนาดความกว้างที่เท่ากัน จากรูปตัดขวางในแนวดิ่ง (b=c in.) ในภาพที่ 25 และคอนกรีตเป็นตัวนำไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติเหมือนกันภายใต้เงื่อนไขของการให้เหล็กเสริมเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมอ

ชิ้นส่วนต่างๆที่ประกอบรวมกันของ Guard electrode (GE) และ CE แสดงในรูปที่ 24 ในช่องว่างที่มีวงแหวนล้อมรอบเป็นตำแหน่งของ CE และ RE จะเป็นตัวตอบสนองของการส่งสัญญาณจาก Polarized area ของเหล็ก โดย CEประกอบไปด้วย graphite รูปทรงกระบอกเป็นขั้วไฟฟ้า และพลาสติกสังเคราะห์ (Polyethylene) หรือ แก้ว (glass) เป็นวัสดุทำหน้าที่เป็นฉนวน



ภาพที่ 3.14 ชิ้นส่วนที่ประกอบรวมกันของ CE และ GE: a) Top View : b) Cross Section View

ที่มา : SHAP-S-324

สำหรับในตารางที่ 3-6 เป็นผลจากการวัดค่า R_p ของมอร์ตาตัวอย่างขนาดเล็ก โดยใช้ (NSC device) เป็นเครื่องมือวัด จากทุกตัวอย่างค่าของ R_p จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอันดับขนาดและเมื่อใช้ (GE) แสดงให้เห็นว่าสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ส่งจาก CE จะช่วยลด Polarized area ตามอันดับขนาด ผลลัพธ์ที่ได้นี้เป็นที่ยอมรับและแสดงให้เห็นว่า GE มีประสิทธิภาพในการจำกัดขอบเขตการกระจายของการส่งสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ดี (Jackson,P.D.,1981 and Matsuoka,K.,1990)



ตารางที่ 3.6 ความต้านทานโพลาไรซ์ (R_p) ได้จากการวัดโดยเครื่องมือ NSC device ด้วยมอร์ตาร์ท

ตัวอย่างขนาดเล็กโดยใช้ Guard electrode (GE)

Specimen	Polarization Resistance ($k\Omega.cm^2$)		Low Frequency Used (Hz)
	W/O GE	W/GE	
1	1.42	17.12	0.01
1	1.06	11.69	0.04
2	0.94	13.77	0.01
2	0.59	9.95	0.04
3	1.16	18.74	0.01
3	0.90	14.35	0.04

ที่มา : SHAP-S-324

อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยจำนวนมากที่ใช้สมมติฐานในการส่งสัญญาณจาก CE ไปยัง Polarized area ที่อยู่ด้านล่างรอบๆเหล็กเสริมโดยสมบูรณ์ โดยที่ค่าจำกัดความของ Polarized area เขียนได้ดังสมการที่ 3-11 (Matsuoka,K.,1990)

$$A = 2\pi rL \tag{3-11}$$

เมื่อ

r = รัศมีของเหล็กเสริม และ

L = ความยาวของของ CE

Matsuoka ได้ประยุกต์ใช้วิธีการ Finite element ในการวิเคราะห์หาค่าความยาว L ในขณะที่สมมติฐานว่า Polarized area ทั้งหมดกระทำโดยรอบของเหล็กเสริมระหว่างการวัดค่า R_p และในระหว่างการทดลองได้ใช้คอมพิวเตอร์ในการเลียนแบบจากของจริงพบว่าไม่สามารถที่จะ Polarized area รอบๆเหล็กเสริมได้ทั้งหมดแต่ถ้าต้องการที่จะใช้ CE ส่งสัญญาณกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวเพื่อให้ Polarized area รอบๆของเหล็กเสริมได้โดยสมบูรณ์ Equipotential lines ต้องขนานกับพื้นผิวของเหล็กเสริม ดังนั้น Current Line ต้องตั้งฉากกับเส้น Potential Lines มีทิศทางเป็นเส้นตรงไปยัง Polarized ที่ผิวของเหล็กเสริม และเมื่อใช้ GE และ CE จะสามารถช่วยรักษาศักย์ไฟฟ้าให้มีค่าความเสถียรและดังนั้นพื้นที่ของเหล็กเสริมที่ถูก Polarized ก็จะไม่เกิดการช้อนทับกันค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลจะมีความเสถียร



บทที่ 4

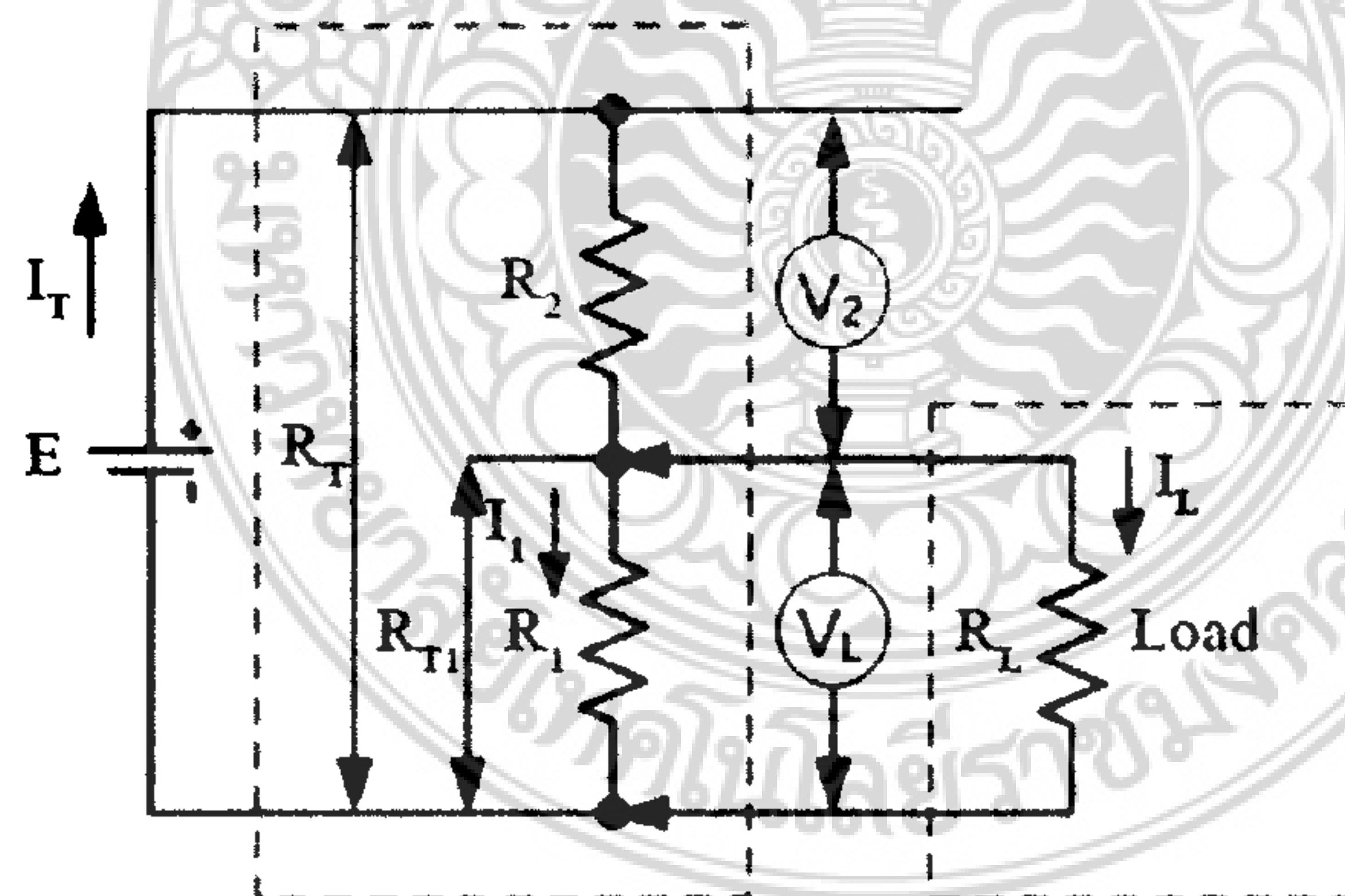
วงจรไฟฟ้าและระบบการประมวลผลโปรแกรม

4.1 วงจรแบ่งแรงดันและกระแสไฟฟ้า

4.1.1 วงจรแบ่งแรงดัน

เป็นสภาวะของวงจรที่ต่อโหลด (Load) เข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรเกิดขึ้น โดยกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานแต่ละตัวที่ทาหน้าที่แบ่งแรงดันวงจร เปอร์เซ็นต์ของกระแสไหลลด มีการต่อวงจร ดังภาพ 4.1 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider Circuit) หมายถึงวงจรที่ประกอบด้วยความต้านทาน 2 ตัวขึ้นไปต่ออนุกรม (Series) อยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Power Supply) โดยค่าความต้านทานในวงจรจะทำหน้าที่แบ่งแรงดันไฟฟ้าในวงจร ซึ่งแบ่งวงจรออกเป็น 2 แบบ คือ

1. วงจรแบ่งแรงดันที่ไม่มีโหลด (Unloaded Voltage Divider) เป็นวงจรในสภาวะที่ยังไม่ต่อโหลดเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า โดยจะมีตัวต้านทานต่ออนุกรมอยู่กับวงจร ในสภาวะนี้ยังไม่มีกระแสไฟฟ้าจ่ายสู่โหลด (Load) ที่ต่ออยู่ภายนอก
2. วงจรแบ่งแรงดันที่มีโหลด (Load Voltage Divider) เป็นสภาวะของวงจรที่ต่อโหลด (Load) เข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะทำให้มีกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 4-1 วงจรการแบ่งแรงดันที่มีโหลด

ที่มา : John 2003

เมื่อ

E = แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของวงจร

R_1, R_2 = ความต้านทานที่ต่ออยู่ภายในวงจร



- R_L = ความต้านทานของโหลด
 R_T = ความต้านทานรวมทั้งหมดของวงจร
 I_T = กระแสที่ไหลในวงจรทั้งหมด
 I_1 = กระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน R_1
 I_L = กระแสที่ไหลผ่านโหลด
 V_L = แรงดันตกคร่อมโหลด
 V_2 = แรงดันตกคร่อมความต้านทาน R_2

จากวงจรดังภาพที่ 4.1 จะได้ความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$R_{T1} = \frac{R_1 \times R_L}{R_1 + R_L} \quad (4-1)$$

ดังนั้น

$$R_T = R_{T1} + R_2 \quad (4-2)$$

และสมการหาค่าแรงดันจะได้

$$V_L = E \frac{R_{T1}}{R_T}$$

$$V_L = E \frac{R_2}{R_T}$$

$$V_2 = E - V_L \quad (4-3)$$

สมการหาค่ากระแสจะได้

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} \quad (4-4)$$

$$I_1 = \frac{V_L}{R_1}$$

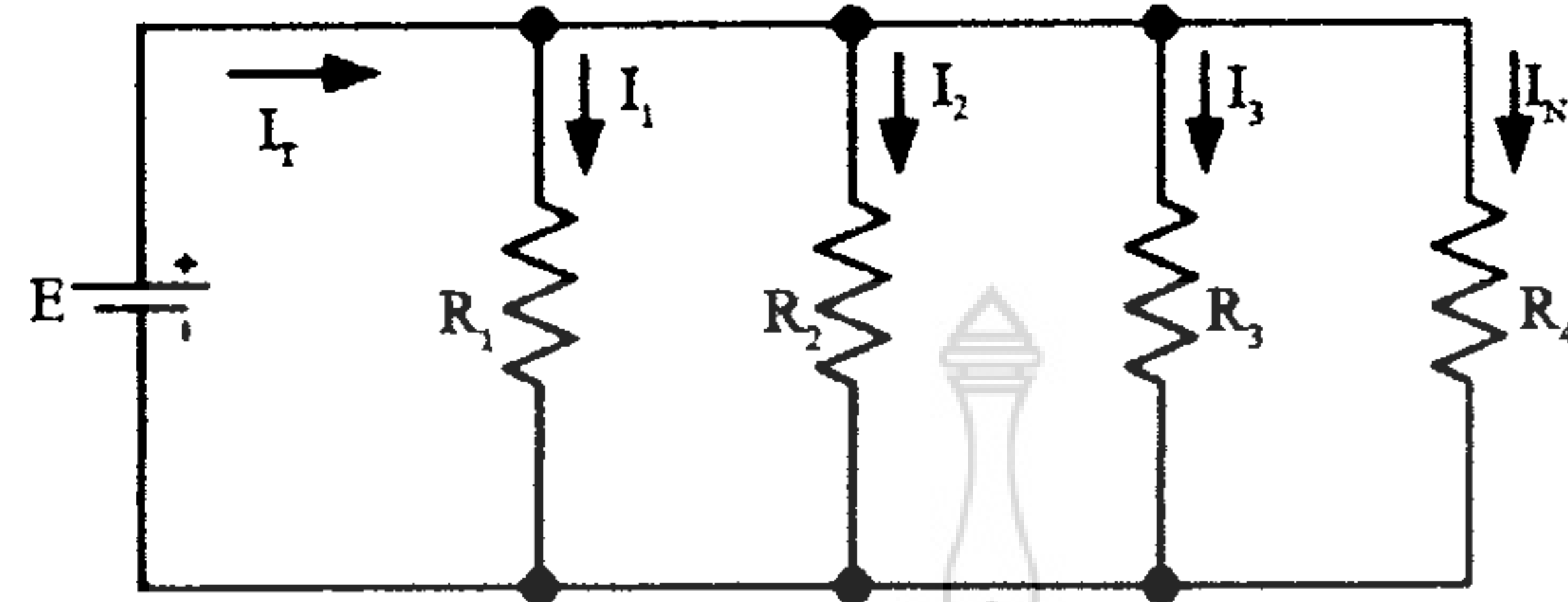
$$I_T = I_1 + I_2 \quad (4-5)$$

4.1.2 วงจรแบ่งกระแส

วงจรแบ่งกระแสไฟฟ้า (Current Divider Circuit) ประกอบด้วยความต้านทาน 2 ตัวขึ้นไปต่อขนาน (Parallel กับแหล่งจ่าย Power Supply) โดยค่าของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทาน (Resistor) ที่แบ่งกระแสออกมานั้นจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่ต่ออยู่ภายในวงจร ถ้าใช้กฎของโอห์ม วงจรแบ่ง ใช้หลักการของวงจรไฟฟ้าแบบขนาน (Parallel Circuit) เนื่องจากวงจรขนานมีกระแสไหลผ่านตัวต้านทานหรือโหลดในแต่ละสาขาไม่เท่ากัน (หากความต้านทานมีค่าไม่เท่ากัน) กระแสไฟฟ้าจะ



ถูกแบ่งให้ไหลผ่านไปในสาขาต่างๆ ตามพิกัดความต้านทานของไหลคนั้นๆ แต่เมื่อนากระแสที่ไหลผ่านไหลทุกตัวในวงจรรวมกันแล้วจะมี ค่าเท่ากับกระแสที่จ่ายให้แก่วงจร จากหลักการนี้ แสดงได้ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4-2 ความต้านทานต่อขนานกันหลายตัว

ที่มา : John 2003

พิจารณาจากคุณสมบัติวงจรขนาน จะได้แรงดันไฟฟ้า ดังนี้

$$E = V_{R1} = V_{R2} = V_{R3} = V_{RN} \quad (4-6)$$

หรือกฎของโอห์ม จะได้

$$I_T R_T = I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3 = I_N R_N \quad (4-7)$$

$$I_N = I_T \frac{R_T}{R_N} \quad (4-8)$$

- เมื่อ I_N = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทานใดๆ
- I_T = กระแสไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่ไหลในวงจร
- R_N = ความต้านทานแต่ละตัวที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

4.2 วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลและสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก

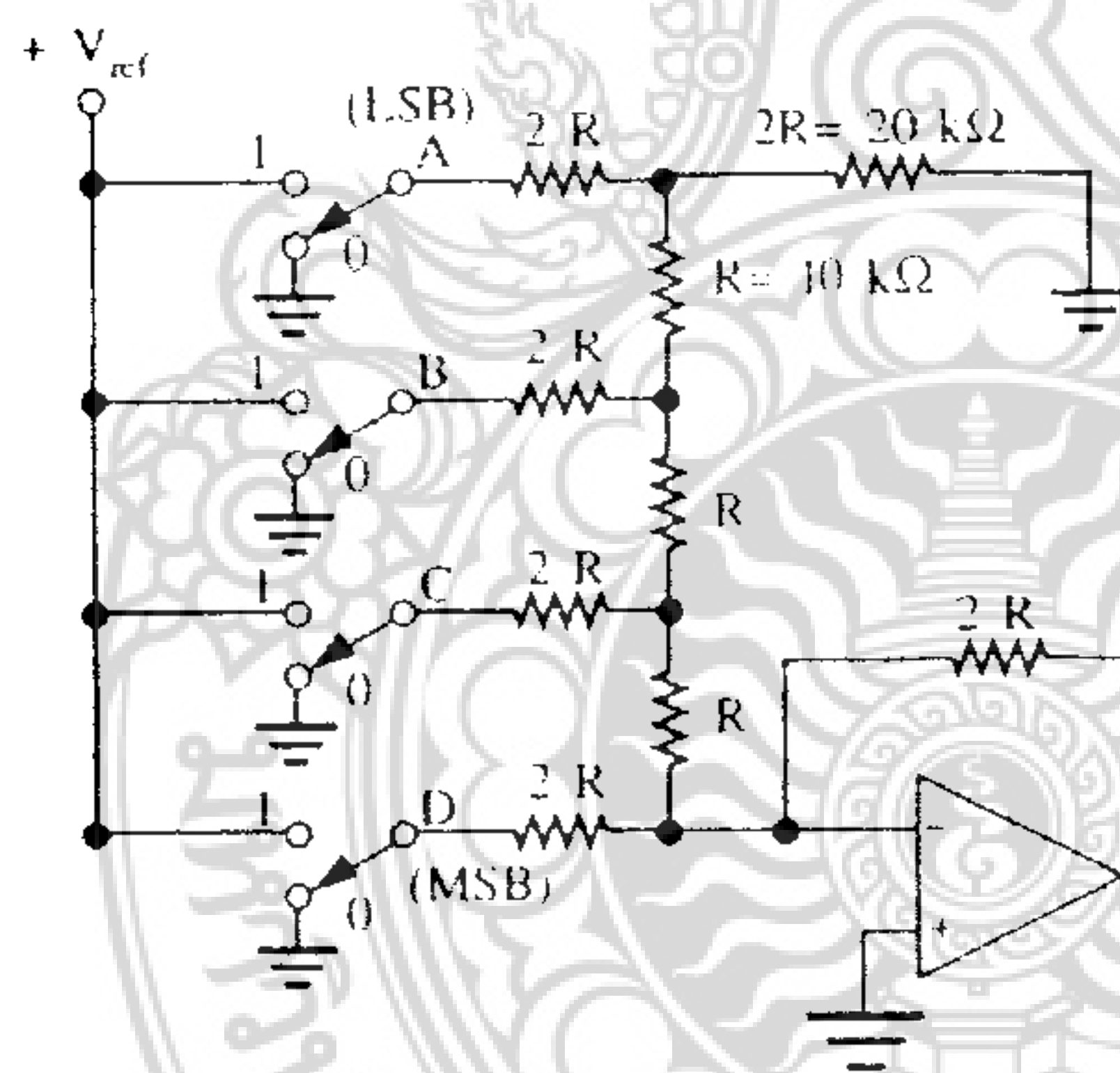
สัญญาณอนาล็อกและสัญญาณดิจิทัล เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณต่าง ๆ เช่น การตรวจจับสัญญาณแสงความร้อน อุณหภูมิ ความเร็วและตำแหน่ง โดยต้องใช้อุปกรณ์ตรวจจับต่างๆ ทำหน้าที่แปลงปริมาณทางฟิสิกส์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น แปลงปริมาณทางฟิสิกส์เป็นแรงดันไฟฟ้า หรือ ตัวแปลงสัญญาณอุณหภูมิเป็นแรงดัน สามารถแปลงอุณหภูมิ 1°C ต่อ 10 mV หรือ ตัวตรวจจับความเร็วรอบ สามารถแปลงความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาทีเป็นแรงดัน 100 mV เป็นต้น ตัวตรวจจับเหล่านี้ให้ปริมาณแรงดันไฟฟ้าออกมา แรงดันไฟฟ้านี้คือ สัญญาณอนาล็อกซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณทางฟิสิกส์ที่ตรวจจับได้ สัญญาณเหล่านี้เมื่อนำมาประมวลผลด้วยเครื่อง



คอมพิวเตอร์จะต้องมีการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล การจะส่งสัญญาณกลับออกมาเป็น อนาล็อก จึงต้องใช้วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก ดังภาพที่ 4.3 เป็นระบบดิจิทัลที่รับแรงดันอนาล็อกในย่าน $0 - 10 \text{ V}$ มาแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยตัวแปลงอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และส่งสัญญาณดิจิทัลเข้าวงจรประมวลผลด้วยระบบดิจิทัล (Digital processing unit) เมื่อประมวลผล โดยแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกด้วยวงจรตัวแปลงดิจิทัลเป็นอนาล็อก จะได้แรงดันอนาล็อกค่านอก $0 - 10 \text{ V}$ เหมือนกับสัญญาณแรงดันเข้า

4.2.1 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกแบบ R/2R แลคเคอร์

วงจรแปลงดิจิทัลเป็นอนาล็อกที่ผ่านมาเมื่ออินพุตมีจำนวนบิตมากขึ้น เช่น วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก ขนาด 12 บิต จะเกิดปัญหาเรื่องค่าความต้านทานที่ LSB จะมีค่าสูงมากประมาณ $2 \text{ M}\Omega$ ซึ่งมีปัญหาในการหาค่าความต้านทานค่าต่าง ๆ ที่แตกต่างกันถึง 12 ค่า จึงมีการออกแบบวงจรที่ใช้ค่าความต้านทานน้อย ๆ เช่น วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก แบบ R/2R แลคเคอร์ ดังแสดงในภาพที่ 4.4 ซึ่งใช้ตัวต้านทานเพียง 2 ค่าเท่านั้นคือ $10 \text{ k}\Omega$ ทำให้ออกแบบและสร้างวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณ อนาล็อกได้ง่ายยิ่งขึ้น



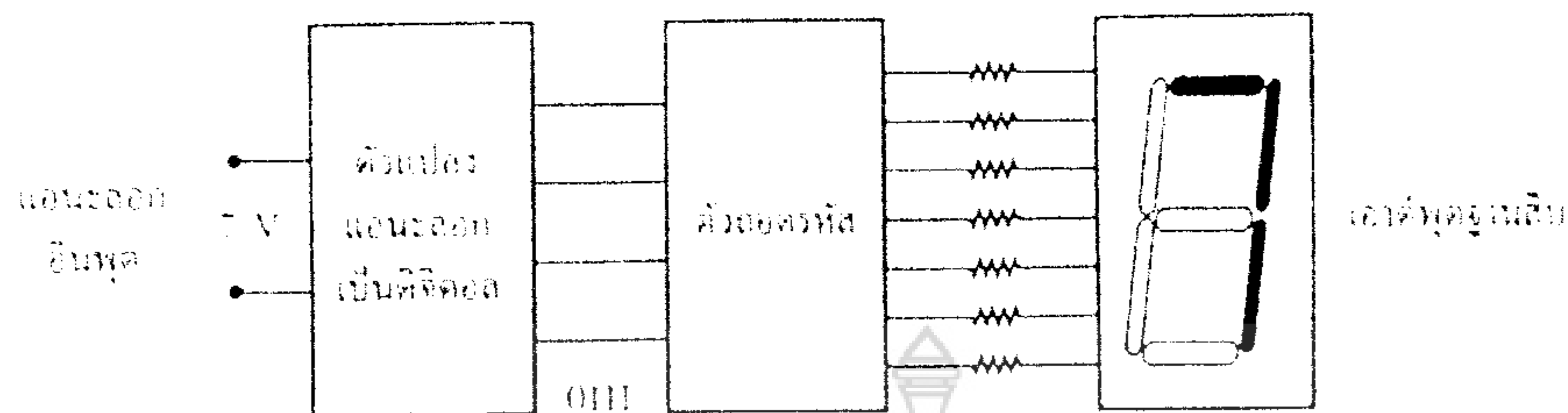
ภาพที่ 4-3 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก 4 บิต แบบ R/2R แลคเคอร์

ที่มา : Malfaor 2001

4.2.2 การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Converter)

วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบสัญญาณลาดเอียง วงจรการแปลงอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล วงจรพื้นฐานแสดงในภาพที่ 4-4 ด้านอินพุตของวงจรับแรงดันอนาล็อก และวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ทำหน้าที่แปลงแรงดันอนาล็อกให้

เป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 4 บิต ค่าแรงดันต่ำสุด 0 V จะได้รับรหัสดิจิทัลเอาต์พุต 4 บิต เท่ากับ 0000 และที่ค่าแรงดันอินพุต จะได้รับรหัสดิจิทัลเอาต์พุต 4 บิต เท่ากับ 1111



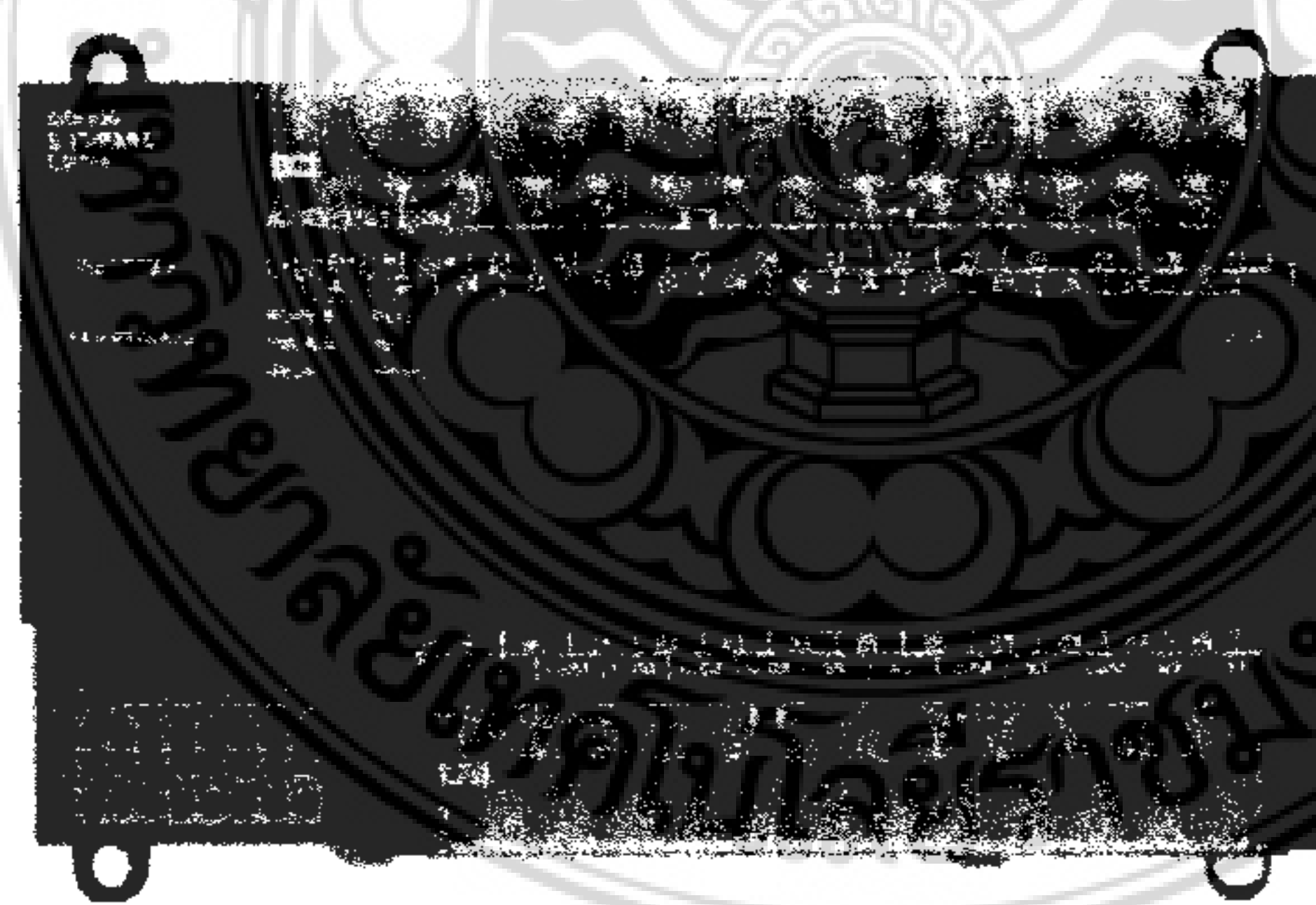
ภาพที่ 4-4 อนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

ที่มา : Malfaor 2001

4.3 โปรแกรมคอนโทรลเลอร์

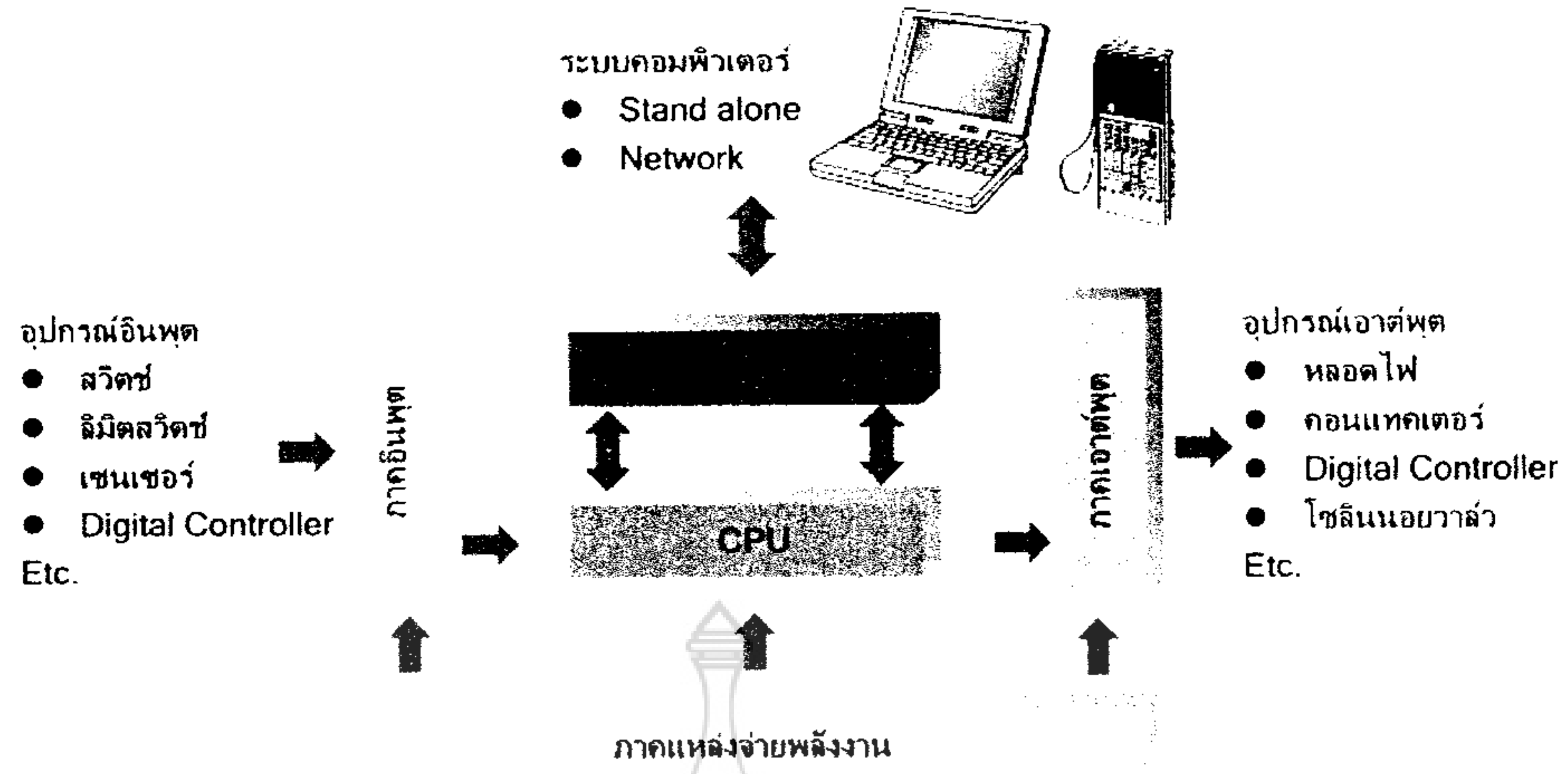
4.3.1 คุณสมบัติทั่วไปของโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

PLC สามารถควบคุมการทำงานของเครื่องจักรหรือระบบต่างๆ แทนวงจรรีเลย์แบบเก่า ซึ่งวงจรรีเลย์มีข้อเสียคือ การเดินสายและการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการควบคุมมีความยุ่งยาก และเมื่อใช้งานไปนานๆ หน้าสัมผัสของรีเลย์จะเสื่อม ทำให้ขาดเสถียรภาพ ในการควบคุม PLC จึงเข้ามาทดแทนวงจรรีเลย์ เพราะ PLC ใช้งานได้ง่ายกว่า สามารถต่อเข้ากับอุปกรณ์อินพุต/เอาต์พุตได้โดยตรง นอกจากนั้นเพียงแค่เขียนโปรแกรมควบคุมก็สามารถใช้งานได้ทันที ถ้าต้องการจะเปลี่ยนเงื่อนไขใหม่สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงโปรแกรม



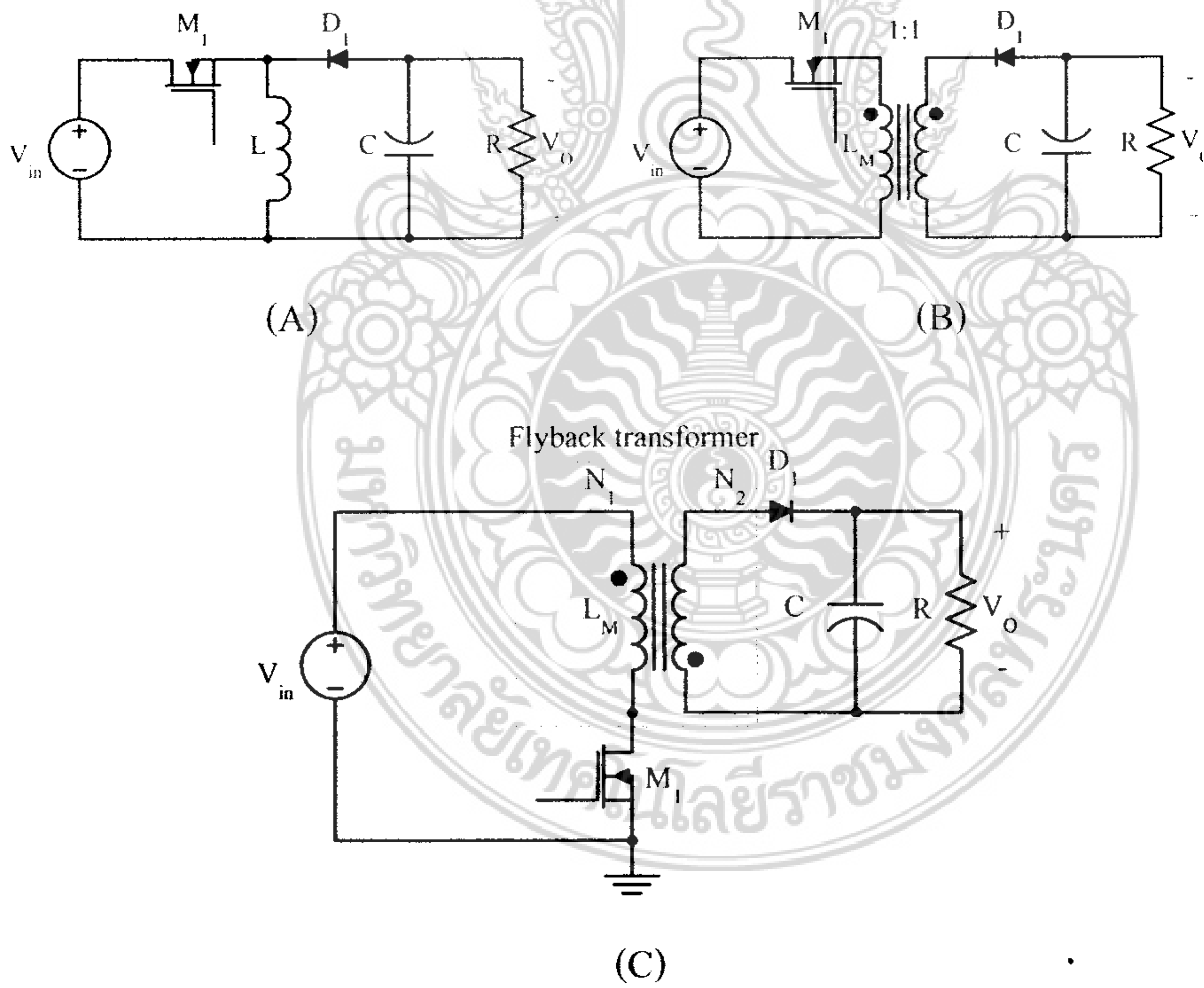
ภาพที่ 4-5 โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

ที่มา : Omron.Co.Ltd 2008



ภาพที่ 4-6 ไคอะแกรมภายใน PLC
ที่มา : Omron.Co.Ltd 2008

4.4 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์



ภาพที่ 4.7 ขั้นตอนการพัฒนาวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์จากวงจรแบบบัก-บูสต์
ที่มา : ศุภชัย 2007

- (A) วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบีก-บัสต์
- (B) วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบีก-บัสต์ที่ได้จากการใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบสองขด
- (C) วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบฟลายแบค

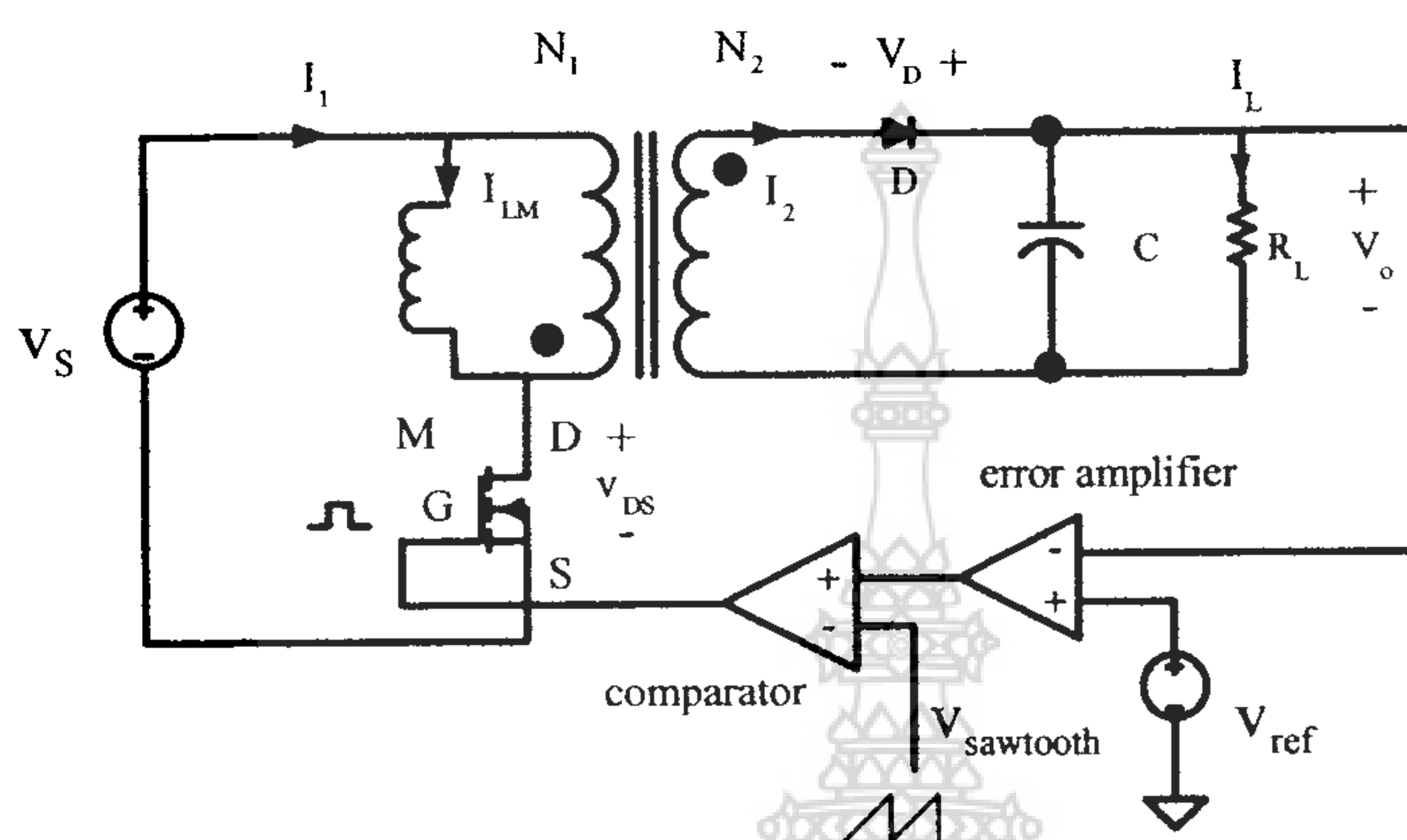
วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์พัฒนามาจากวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบีก-บัสต์ ซึ่งลำดับขั้นตอนการพัฒนาแสดงตามภาพที่ 4.7 กล่าวคือจากวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบบีก-บัสต์ตามภาพที่ 4.7(A) ถ้าตัวเหนี่ยวนำ L ในภาพแยกออกเป็นขดลวดสองขดพันบนแกนอันเดียวกันและมีจำนวนรอบเท่ากันดังภาพที่ 4-7(B) การทำงานของวงจรในทุกๆคาบเวลาของการสวิตช์ คือในช่วงเวลาที่มอเตอร์เฟด (M_1) นำกระแสไฟฟ้า (ON) และไดโอด (D_1) ไม่นำกระแสไฟฟ้าเนื่องจากถูกไบแอสย้อนกลับช่วงเวลานี้คือช่วงเวลาที่ตัวเหนี่ยวนำทางอินพุต (L_m) เก็บพลังงาน ในช่วงเวลาที่ M_1 หยุดนำกระแสไฟฟ้า (OFF) สนามแม่เหล็กในแกนขุดตัวทำให้สภาพขั้วของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำทางด้านทุติยภูมิเปลี่ยนแปลงมีผลให้ D_1 นำกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการถูกไบแอสตรงช่วงเวลานี้พลังงานที่เก็บไว้ใน L_m ได้ถ่ายโอนไปยังขดลวดทุติยภูมิและจ่ายพลังงานนี้ให้กับโหลด (R) และตัวเก็บประจุไฟฟ้า (C) ดังนั้นวงจรในภาพที่ 4-7 (B) ยังคงทำงานเหมือนกับวงจรตามภาพที่ 4-7 (A) เพียงแต่อินพุตและเอาต์พุตได้ถูกแยกจากกันทางไฟฟ้า (electrical isolation) ด้วยตัวเหนี่ยวนำเอาไว้ (coupled inductor) ที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าหม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบค หม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบคแตกต่างจากหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไปคือ จะมีช่องว่างอากาศในแกนเพื่อการสะสมพลังงานวงจรฟลายแบคในภาพที่ 4-7 (C) เกิดจากการย้ายตำแหน่งของมอเตอร์กำลัง M_1 โดยให้ขา ซอร์สเทียบกับการาวนและกำหนดให้ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิพันกลับทิศกันซึ่งทำให้ต้องกลับขั้วของไดโอดด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ช่วยให้สามารถเลือกให้ขั้วของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_o ตรงกันหรือตรงข้ามกับแรงดันไฟฟ้าอินพุต V_m ได้ และสามารถเลือกขนาดของแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิได้ตามต้องการ โดยใช้อัตราส่วนจำนวนรอบ จะสังเกตุว่าวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบฟลายแบคดังแสดงในภาพที่ 4-7 (C) ประกอบด้วยอุปกรณ์จำนวนน้อยชิ้น และอุปกรณ์สวิตช์ต่อกลับจุดอ้างอิงที่เป็นกราวน ซึ่งทำให้ง่ายต่อการสร้างวงจรขับอุปกรณ์สวิตช์

วงจรการควบคุมสำหรับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์

การรักษาแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสำหรับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ทำได้โดยการควบคุมช่วงเวลาการนำกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์กำลัง การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่นิยมมีสองแบบคือ การควบคุมในโหมดแรงดัน (voltage mode control) และการควบคุมในโหมดกระแส (current mode control)

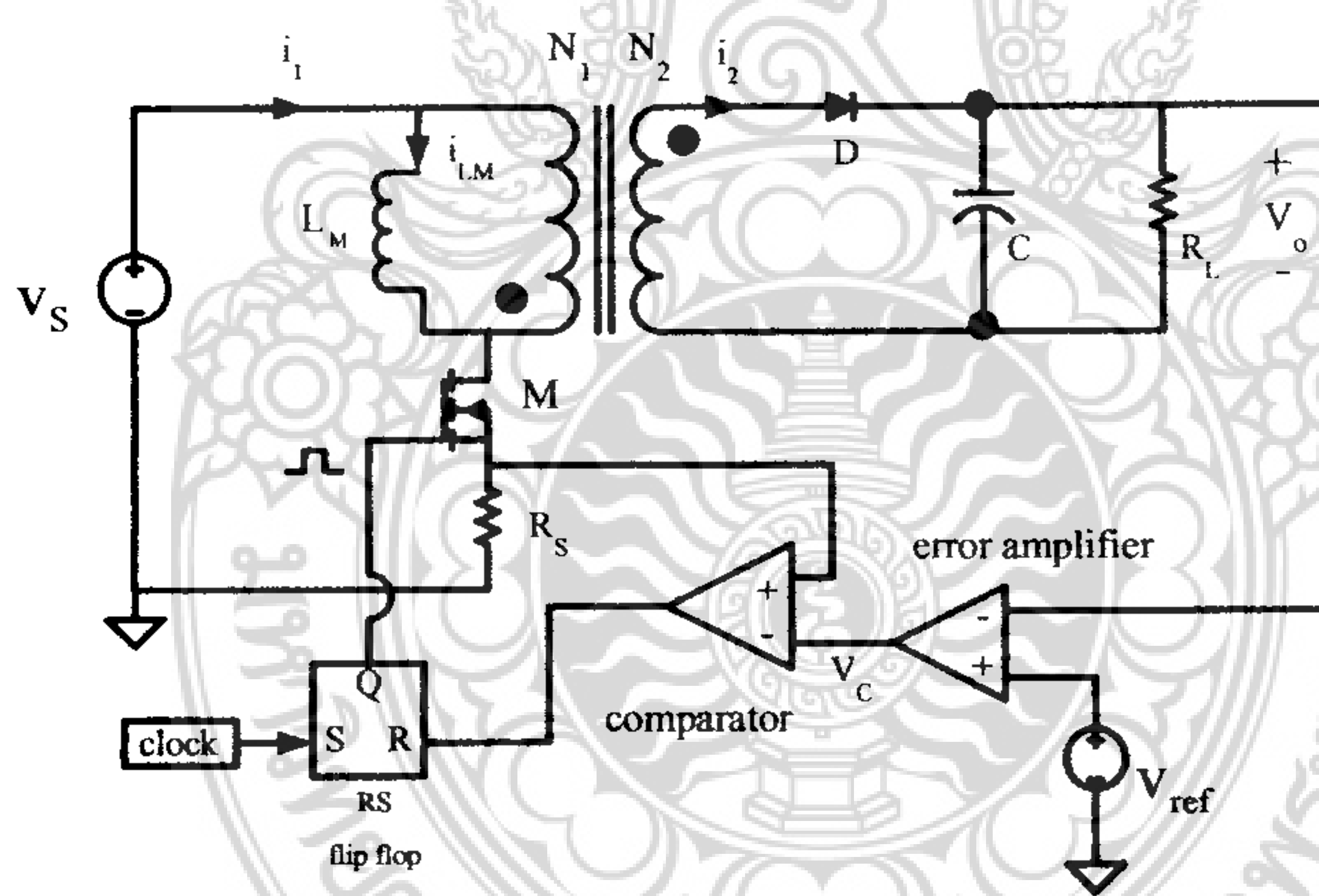


1. การควบคุมในโหมดแรงดัน (voltage mode control) ดังแสดงในภาพที่ 4-8 V_o ถูกควบคุมโดยการป้อนกลับไปยังวงจรรขยายความผิดพลาด (error amplifier) สัญญาณผิดพลาด (V_c) จะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อย ($V_{sawtooth}$) เพื่อสร้างสัญญาณพีดีบีเอ็ม (PWM) ขับมอเตอร์เฟสเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทให้คงที่



ภาพที่ 4-8 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ควบคุมแบบแรงดัน (voltage mode control)

ที่มา : Cuk 2001



ภาพที่ 4.9 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ควบคุมแบบกระแส (current mode control)

ที่มา : Cuk 2001

2. การควบคุมในโหมดกระแส (current mode control) ดังแสดงในภาพที่ 4.9 ในแต่ละคาบของการสวิตช์สัญญาณ clock ความถี่ที่จะเซต RS flip flop ทำให้มอเตอร์เฟสนำกระแสไฟฟ้า V_o ถูกควบคุมโดยการป้อนกลับไปยังวงจรรขยายความผิดพลาด สัญญาณผิดพลาด (V_c) จะถูกเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_s (ซึ่งก็คือสัญญาณกระแสของมอเตอร์เฟส) เมื่อแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_s มี



ค่ามากกว่า V_c RS flip flop จะถูกรีเซ็ต (reset) ทำให้มอสเฟตหยุดนำกระแสไฟฟ้า โดยวิธีการดังกล่าวนี้ความกว้างพัลส์ของสัญญาณ PWM จะเปลี่ยนแปลงเพื่อชดเชย V_o ที่เปลี่ยนแปลงไป

วงจรควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ ทั้งในโหมดควบคุมแบบแรงดันและ โหมดควบคุมแบบกระแส เป็นการควบคุมแบบป้อนกลับในลักษณะลูปปิด (closed loop feedback control) ซึ่งอาจเกิดจากการแกว่ง (oscillation) ขึ้นได้หากไม่มีการชดเชยวงจรถูกควบคุมที่ดีพอ

วงควบคุมจะมีเสถียรภาพเมื่อเงื่อนไขดังต่อไปนี้เป็นจริง

1. เฟสมาร์จินและเกนมาร์จินควรมีค่าเป็นบวกไม่น้อยกว่า 45° และ 6dB ตามลำดับเพื่อความมีเสถียรภาพและไม่ให้แรงดันเอาต์พุตแกว่งมากเกินไป
2. อัตราขยายคิซีควรมีค่ามากพอให้มีการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตที่ดี
3. ความถี่ครอสโอเวอร์ควรมีค่ามากพอให้แรงดันเอาต์พุตตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรเกิน 0.25 เท่าของความถี่ในการสวิตช์เพราะอาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้

4.5 หม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบค

หม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบคเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในวงจรกำลังของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบคือ หม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยที่ไม่เกิดการอิ่มตัว

4.5.1 การหาขนาดของแกน

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบคในวิทยานิพนธ์ใช้เทคนิคค่าผลคูณพื้นที่ (area product, A_p) ซึ่งก็คือค่าผลคูณระหว่างพื้นที่หน้าตัดขวางของแกน (cross sectional area, A_c) กับพื้นที่ที่ใช้บรรจุขดลวด (window area, A_w) ค่า A_p สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบคทำงานในโหมด CCM และ DCM ถูกแสดงดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ [4]

$$A_p = A_c A_w = \frac{P_{o2} \left[\frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{4D_{\min} \alpha}{3}} + \sqrt{\frac{4(1-D_{\min}) \alpha}{3}} \right]}{K_w J \Delta B f_s} \quad (4.9)$$



$$A_p = A_c A_w = \frac{P_{02} \left[\left(\frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{4D_{min}}{3}} \right) + \left(\sqrt{\frac{4(1-D_{min})}{3}} \right) \right]}{K_w J B_{max} f_s} \quad (4.10)$$

- โดย P_{02} : กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบค (W)
 D_{min} : ค่าวัฏจักรหน้าที่ค่าต่ำสุด
 f_s : ความถี่ของการสวิตช์ (Hz)
 α : ตัวเลขดัชนีการถ่ายโอนพลังงานที่มีค่า $0.75 < \alpha < 1$ สำหรับการทำงานในโหมด CCM และเท่ากับ 1 สำหรับการทำงานในโหมด DCM
 η : ค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบค
 K_w : ค่าตัวประกอบการใช้ประโยชน์พื้นที่ที่ใช้บรรจุขดลวด (window utilizing factor)
 J : ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในเส้นลวดที่ใช้พันขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ (A/m^2)
 $\Delta B = B_{max} - B_{min}$: ค่าความแตกต่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
 B_{max} : ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กค่าสูงสุด (T)
 B_{min} : ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กค่าต่ำสุด (T)

ค่าของ P_{02} คำนวณหาได้จากสมการที่ (4.3)

$$P_{02} = (V_o + V_D) I_o \left[\frac{(1 - D_{min})}{D_{min}} \right] \quad (4.11)$$

- โดย V_o : แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเอาต์พุต
 V_D : แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอดขณะที่นำกระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ
 I_o : กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเอาต์พุต

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบคที่ใช้ในวงจรต้นแบบทั้งสี่มีค่าดังนี้

$V_{in,rms} = 198-242 \text{ V}$	$V_o = 5 \text{ V}$	$\Delta V_o = 10\% V_o$	$V_D = 0.7 \text{ V}$
$I_o = 1-5 \text{ A}$	$D_{min} = 0.25$	$\eta = 0.75$	$P_{02} = 85.5 \text{ W}$
$K_w = 0.4$	$\Delta B = 0.1 \text{ T}$	$J = 5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$	$f_s = 50 \text{ kHz}$
$R_L = 1-5 \ \Omega$	$\alpha = 1 \text{ DCM และ CCM}$		



นำค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดข้างต้นไปแทนในสมการที่ (4.9)

ในโหมด CCM ได้ค่า $A_p = 1.5 \times 10^{-8} \text{ m}^4 = 15,000 \text{ mm}^4$ เลือกแกนเฟอร์ไรต์ที่มีค่า A_p สูงกว่าค่า A_p ที่คำนวณได้ คือ แกนแบบ ETD 44 ($A_c = 174 \text{ mm}^2$ $A_w = 213 \text{ mm}^2$ $A_p = 37,062 \text{ mm}^4$)

ในโหมด DCM ได้ค่า $A_p = 0.75 \times 10^{-8} \text{ m}^4 = 7,500 \text{ mm}^4$ เลือกแกนเฟอร์ไรต์ที่มีค่า A_p สูงกว่าค่า A_p ที่คำนวณได้คือแกนแบบ ETD 39 ($A_c = 125 \text{ mm}^2$ $A_w = 174 \text{ mm}^2$ $A_p = 21,750 \text{ mm}^4$)

4.1.2 การหาขนาดจำนวนรอบและขนาดของลวด

จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบคสามารถออกแบบคำนวณดังสมการที่ (4.4)

$$N_1 = \frac{V_{cc, \max} \cdot D_{\min}}{\Delta B \cdot A_c \cdot f_s} \quad (4.12)$$

ในโหมด CCM ที่แรงดันไฟฟ้าคิซีอินพุตสูงสุด ($V_{cc, \max} = 342.2 \text{ V}$) ได้ $N_1 = 136.8$ รอบ ค่าอัตราส่วนจำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิต่อจำนวนรอบปฐมภูมิ (n) คำนวณได้ดังสมการที่ (4.5)

$$n = \frac{N_2}{N_1} = \frac{(V_o + V_D) \left(\frac{1 - D_{\min}}{D_{\min}} \right)}{V_{cc, \max}} \quad (4.13)$$

ได้ $n = 0.05$ ดังนั้นจำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบค $N_2 = n \cdot N_1 = 6.84$ รอบ เลือก $N_2 = 7$ รอบ คำนวณย้อนกลับได้ $N_1 = 140$ รอบ ในโหมด DCM จำนวนรอบ N_1 และ N_2 ของหม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบคมีค่าเท่ากับในโหมด CCM เพื่อประโยชน์ในการเปรียบเทียบ

กระแสไฟฟ้าอาร์เอ็มเอสที่ไหลในขดลวดปฐมภูมิ $I_{1, rms}$ และที่ไหลในขดลวดทุติยภูมิ $I_{2, rms}$ ของหม้อแปลงไฟฟ้าฟลายแบค คำนวณได้ดังสมการที่ (4.6)

$$I_{1, rms} = \frac{\sqrt{2P_o}}{\eta \cdot V_{cc, \min}}$$

$$I_{2, rms} = I_{1, rms} / n \quad (4.14)$$

ที่ $P_o = 25 \text{ W}$ และ ($V_{cc, \min} = 280 \text{ V}$) และ $\eta = 0.75$ ได้ $I_{1, rms} = 0.168 \text{ A}$ และ $I_{2, rms} = 3.37 \text{ A}$

พื้นที่หน้าตัดของขดลวดปฐมภูมิ a_1 และทุติยภูมิ a_2 คำนวณได้ดังสมการที่ (4.14)



$$a_1 = \frac{I_{1, rms}}{J}$$

$$a_2 = \frac{I_{2, rms}}{J} \quad (4-15)$$

ที่ $J = 5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ ได้ $a_1 = 0.033 \text{ mm}^2$ และ $a_2 = 0.674 \text{ mm}^2$

ความลึกจากผิวขดลวดที่นำกระแสไฟฟ้า (skin depth, δ_{cu}) เนื่องจากปรากฏการณ์ทางผิว (skin effect) คำนวณได้ดังสมการที่ (4.8) [1], [5]

$$\delta_{cu} = \sqrt{\frac{\rho_{cu}}{\pi \mu_o \mu_{cu} f_s}} \quad (4-16)$$

ρ_{cu} ความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดมีค่าเท่ากับ ($1.709 \times 10^{-8} \text{ } \Omega \text{ m}$ ที่ $20 \text{ } ^\circ \text{C}$)

μ_o ค่า permeability ของ free space มีค่าเท่ากับ ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)

μ_{cu} ค่า permeability สัมพัทธ์ของขดลวดมีค่าเท่ากับ ($\approx 1 \text{ H/m}$)

ที่ $f_s = 50 \text{ kHz}$ ได้ $\delta_{cu} = 0.2942 \text{ mm}$ ขนาดของขดลวดที่ไม่มีผลกระทบเนื่องจากปรากฏการณ์ทางผิว ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดเพิ่มขึ้นคือ ขดลวดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง (ϕ) น้อยกว่า $2\delta_{cu}$ นั่นคือ $\phi_{cu} < 0.5884 \text{ mm}$ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกขดลวดเบอร์ AWG30 ($a_{30} = 0.0507 \text{ mm}^2$, $\phi_{30} = 0.2540 \text{ mm}$) จำนวนหนึ่งเส้นสำหรับขดลวดปฐมภูมิและเลือกขดลวดเบอร์ AWG24 ($a_{24} = 0.205 \text{ mm}^2$, $\phi_{24} = 0.5105 \text{ mm}$) จำนวนสี่เส้นขนานกันสำหรับขดลวดทุติยภูมิ ความเป็นไปได้ในการพันขดลวดที่เลือกไว้ลงในพื้นที่ที่ใช้พันขดลวดของแกนเฟอร์ไรต์ที่เลือกไว้ สามารถตรวจสอบได้ด้วยสมการที่ (4.9)

$$K_w A_w \geq a_1 N_1 + a_2 N_2 \quad (4-17)$$

ในโหมด DCM แกน ETD39 ($K_w = 0.4$, $A_w = 174 \text{ mm}^2$)

$$0.4 \times 174 \text{ mm}^2 \geq (140 \times 0.0507 \text{ mm}^2) + (7 \times 4 \times 0.205 \text{ mm}^2)$$

$$69.6 \text{ mm}^2 \geq 12.8 \text{ mm}^2$$

ในโหมด CCM แกน ETD44 ($K_w = 0.4$, $A_w = 213 \text{ mm}^2$)

$$0.4 \times 213 \text{ mm}^2 \geq (140 \times 0.0507 \text{ mm}^2) + (7 \times 4 \times 0.205 \text{ mm}^2)$$



$$85.2\text{mm}^2 \geq 12.8\text{mm}^2$$

ดังนั้นแกนแบบ ETD39 และแบบ ETD44 ที่เลือกสามารถรองรับจำนวนขดลวดทั้งหมดได้

4.6 เลือกขนาดการทนกำลังของอุปกรณ์กำลัง

การเลือกพิกัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์กำลัง ไคโอดกำลัง และไคโอดบริดจ์นั้นต้องคำนึงถึงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวอุปกรณ์มีพิกัดกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์กำลังในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ถูกแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พิกัดกระแสไฟฟ้าและพิกัดแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์กำลัง ไคโอดกำลังและไคโอดบริดจ์ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่ใช้ในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

อุปกรณ์	แรงดันไฟฟ้าสูงสุด	กระแสไฟฟ้าสูงสุด	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย
มอเตอร์กำลัง	$2V_{in,pk} + \frac{V_o}{n}$	$\frac{2P_o}{nV_{in,pk}}$	$\frac{4 P_o}{\pi nV_{in,pk}}$
ไคโอดกำลัง	$V_o \left(\frac{1+nV_{in,pk}}{V_o} \right)$	$\frac{1}{n} \frac{2P_o}{nV_{in,pk}}$	$\frac{4 P_o}{\pi n nV_{in,pk}}$
ไคโอดบริดจ์	$V_{in,pk}$	$\frac{2P_o}{nV_{in,pk}}$	$\frac{2 P_o}{\pi nV_{in,pk}}$

4.7 การประมวลผลโปรแกรม

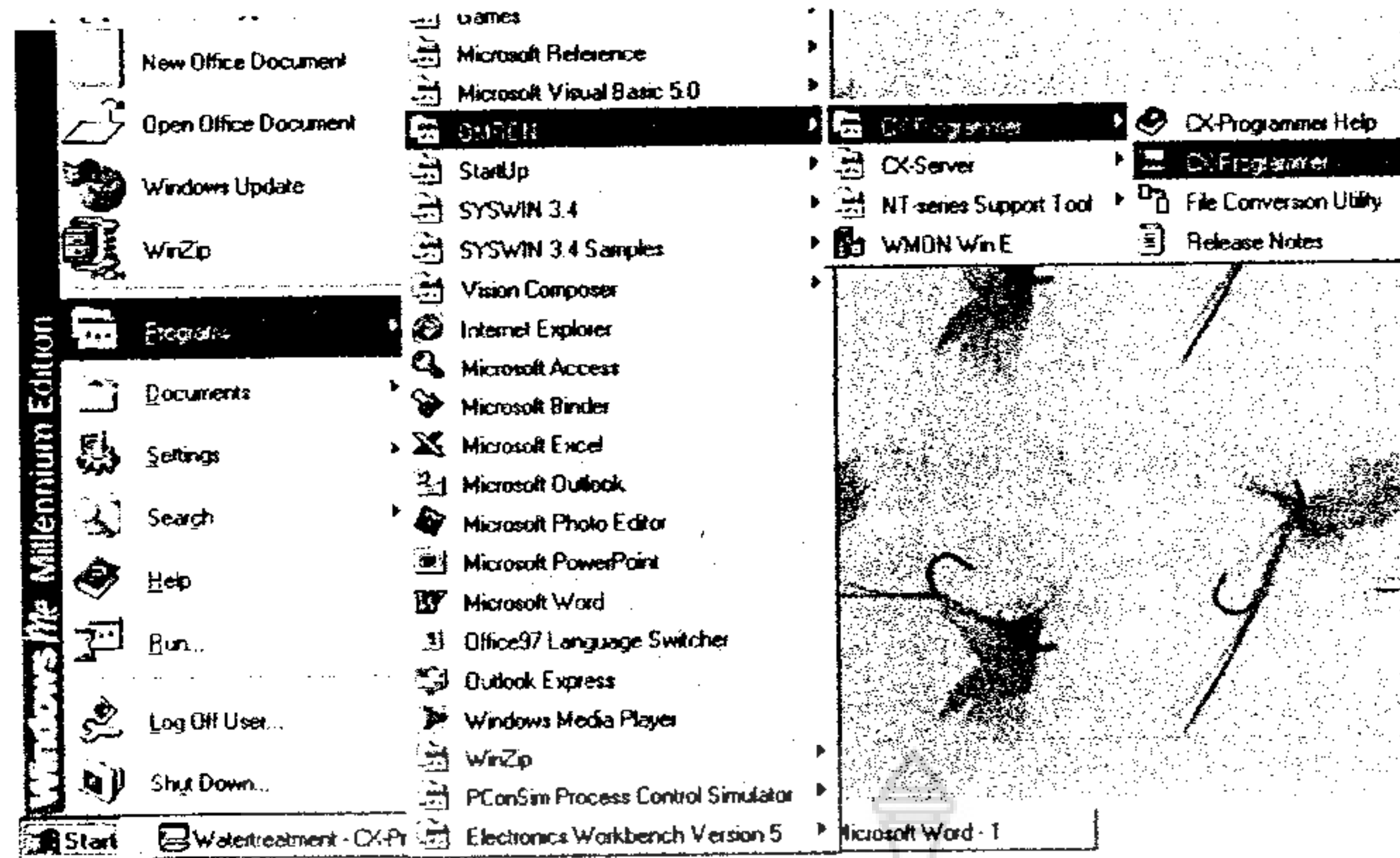
แบ่งเป็นการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีแอลซี OMRON รุ่น CP1L โดยใช้โปรแกรม CX-Programmer ในการควบคุมระบบการทำงานการรับและส่งค่าที่ใช้ในการคำนวณ หาค่าโพลลาไรซ์เซชัน และใช้การสั่งการผ่านจอ Touch Screen โดยใช้โปรแกรม CX- Designer ดังรายละเอียดการทำงานดังต่อไปนี้

4.7.1 CX-Programmer

การเปิดใช้ Software CX-Programmer

Click ปุ่ม start ที่ task bar แล้ว click เลือก program → OMRON → CX-Programmer → CX-Programmer ดังรูป



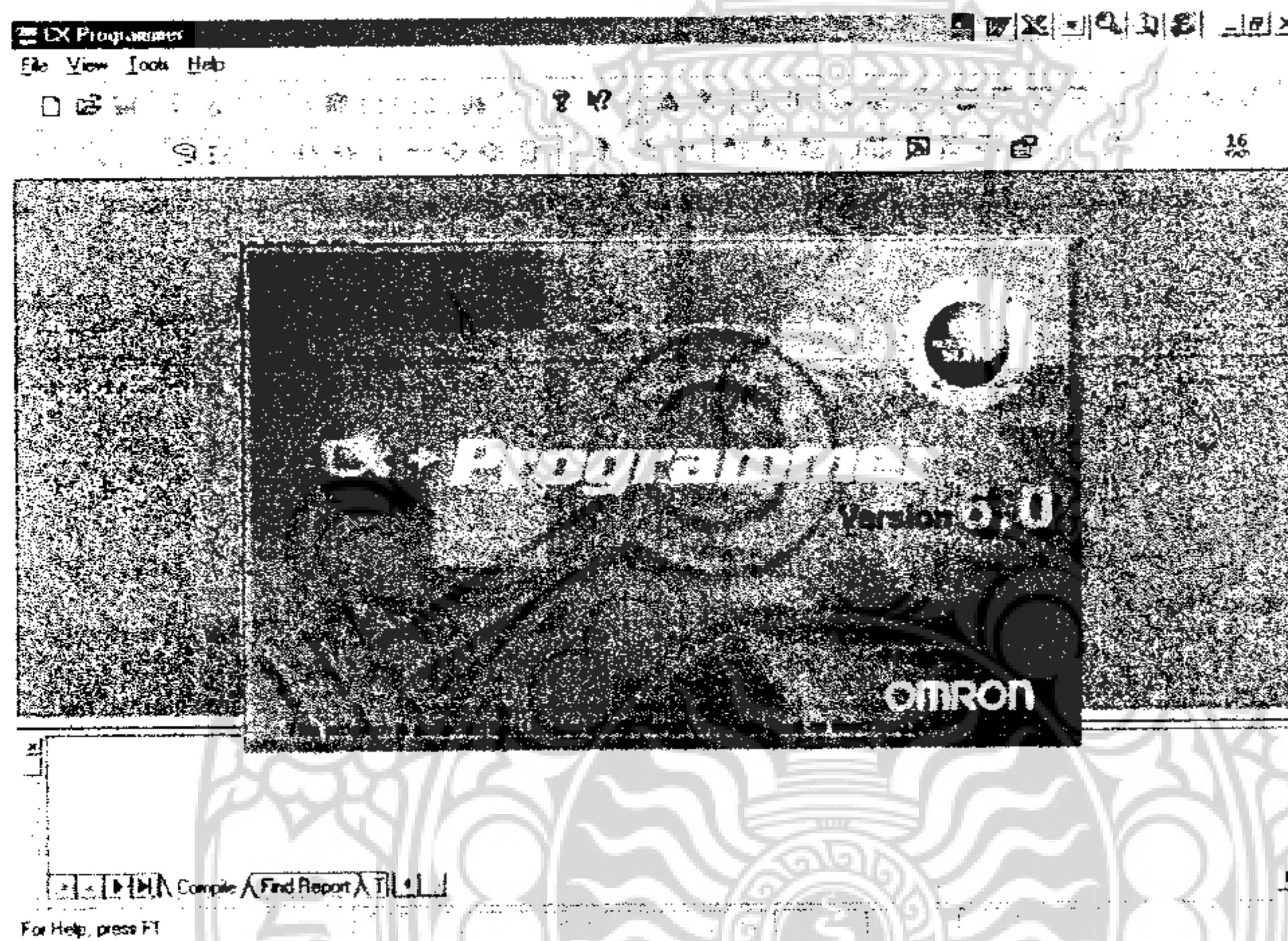


ภาพที่ 4.10 การเปิดใช้งานโปรแกรมควบคุมพีแอลซี

ที่มา : Omron.Co.Ltd

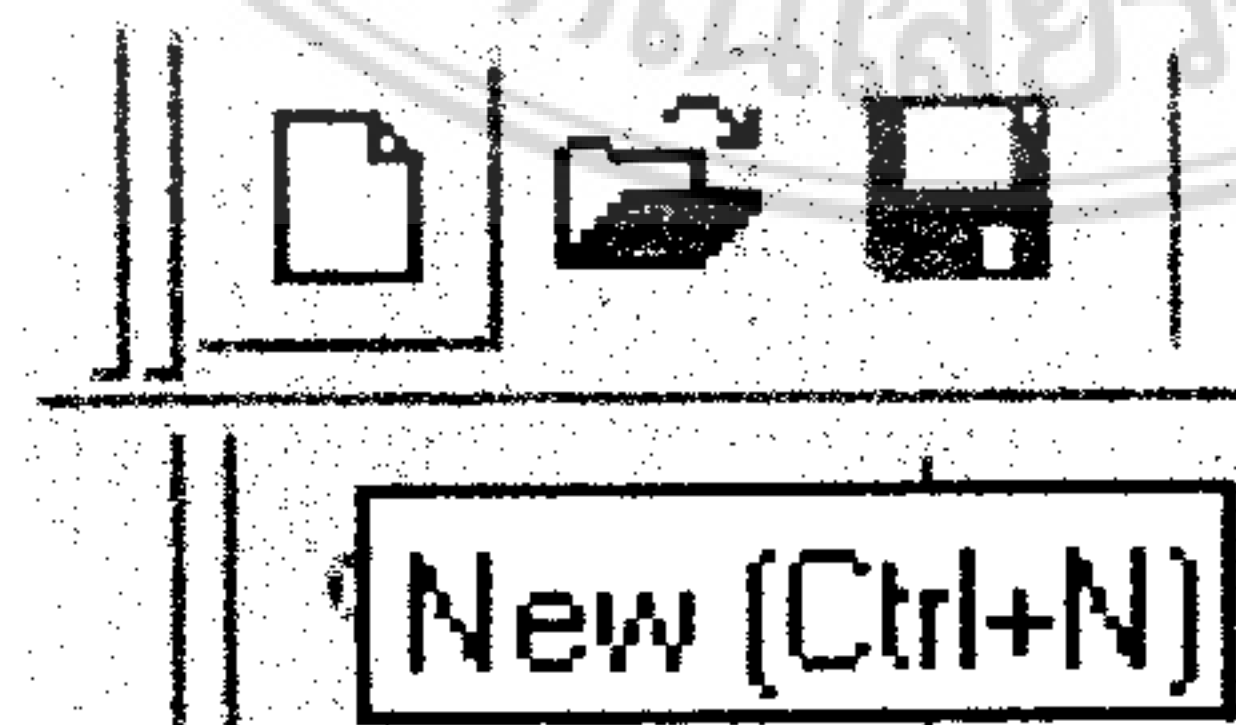
เปิด file หรือสร้าง file ใหม่

เมื่อเปิด software ตัว CX-Programmer ขึ้นมาในขั้นตอนแรก จะขึ้นหน้าจอดังรูป



ภาพที่ 4.11 หน้าจอแรกเมื่อเปิด Software CX-Programmer

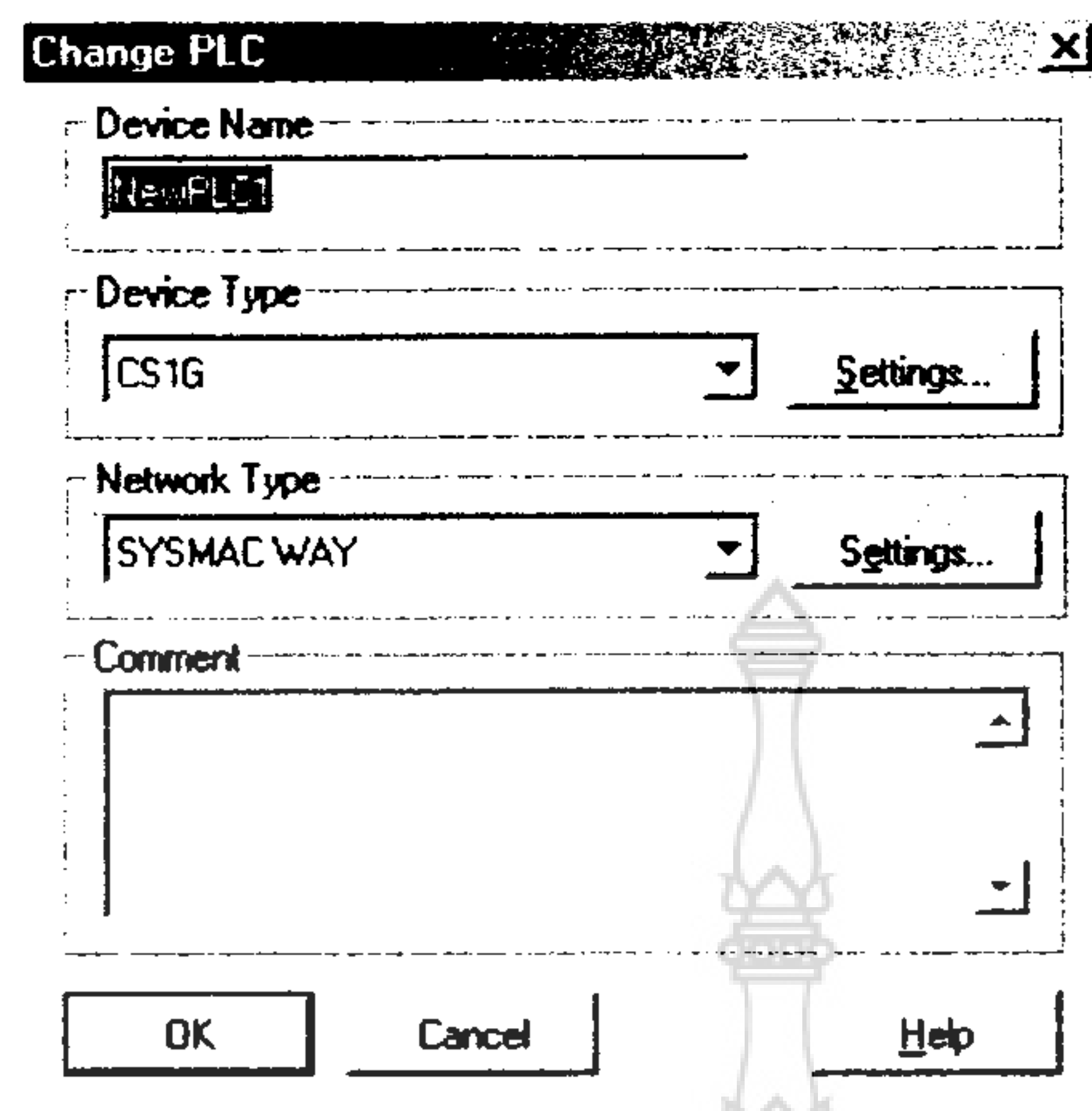
ที่มา : Omron.Co.Ltd



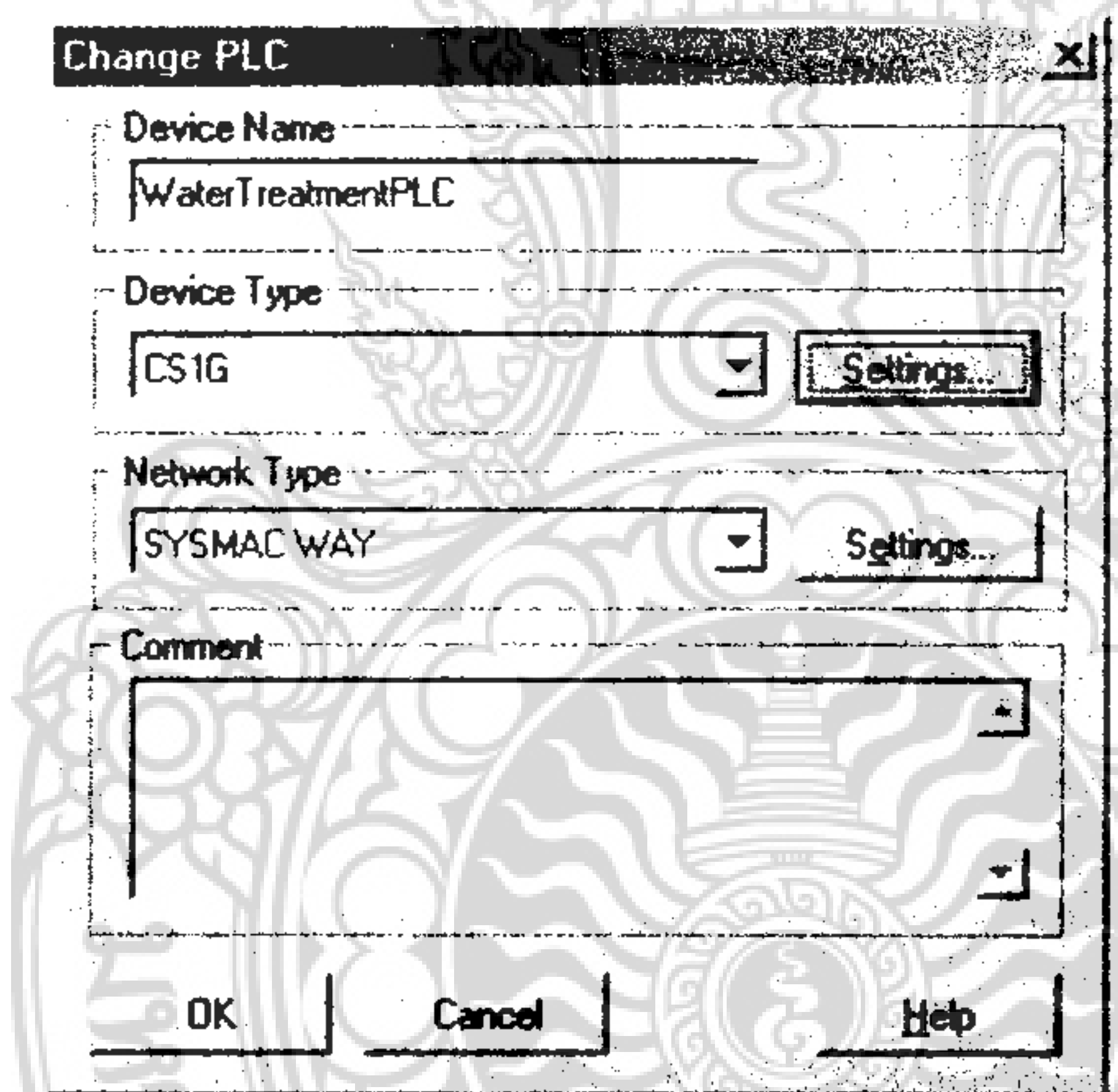
ภาพที่ 4.12 หน้าจอแรกเมื่อเปิด Software CX-Programmer



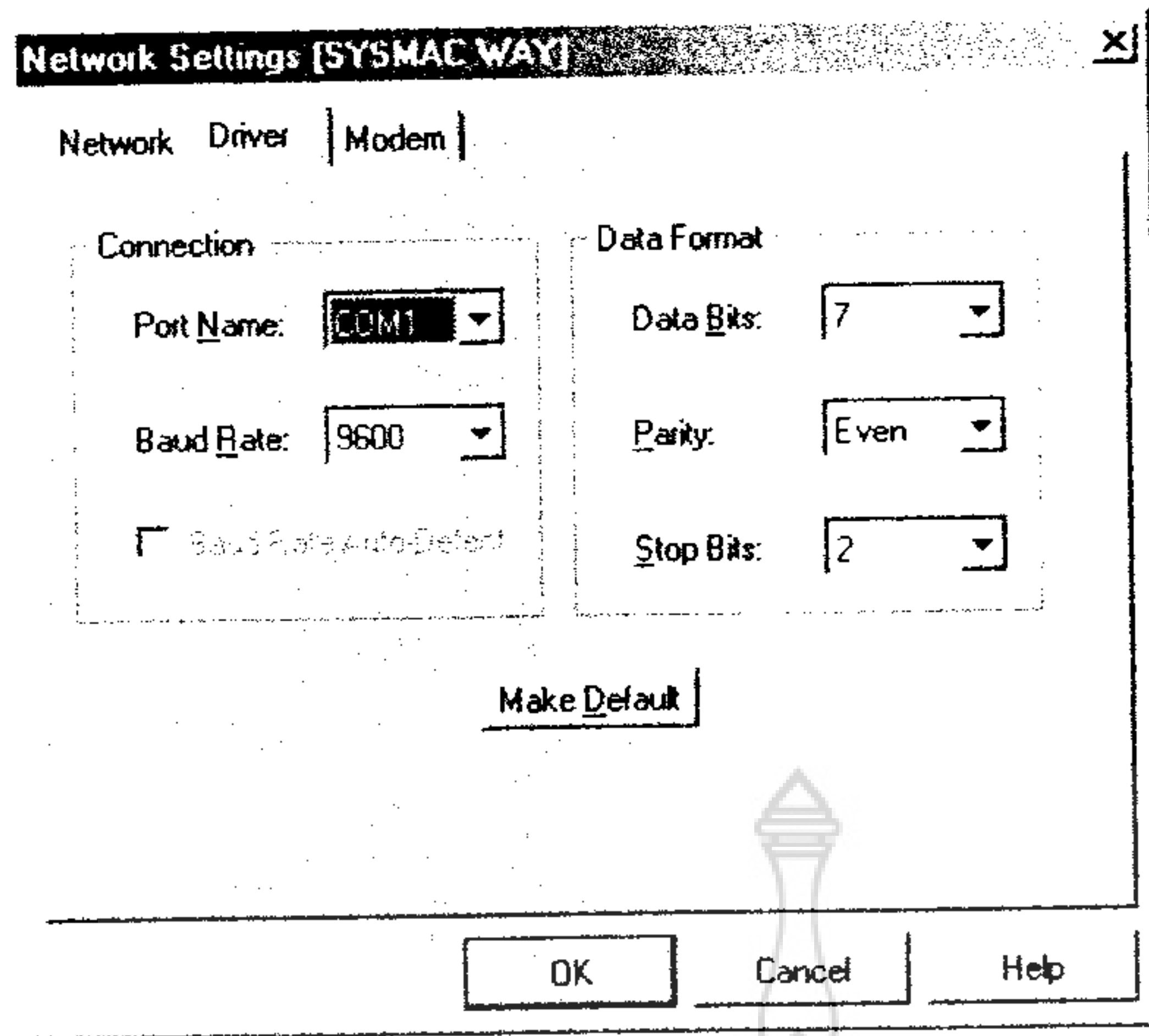
เมื่อ click ปุ่ม สร้าง file. ใหม่ จะมี windows ที่ชื่อ change PLC ขึ้นมาเพื่อให้เลือกรุ่นของ PLC ดังรูป



ภาพที่ 4.13 Windows ที่ชื่อ Change PLC ขึ้นมาเพื่อให้เลือกรุ่นของ PLC
ที่มา : Omron.Co.Ltd

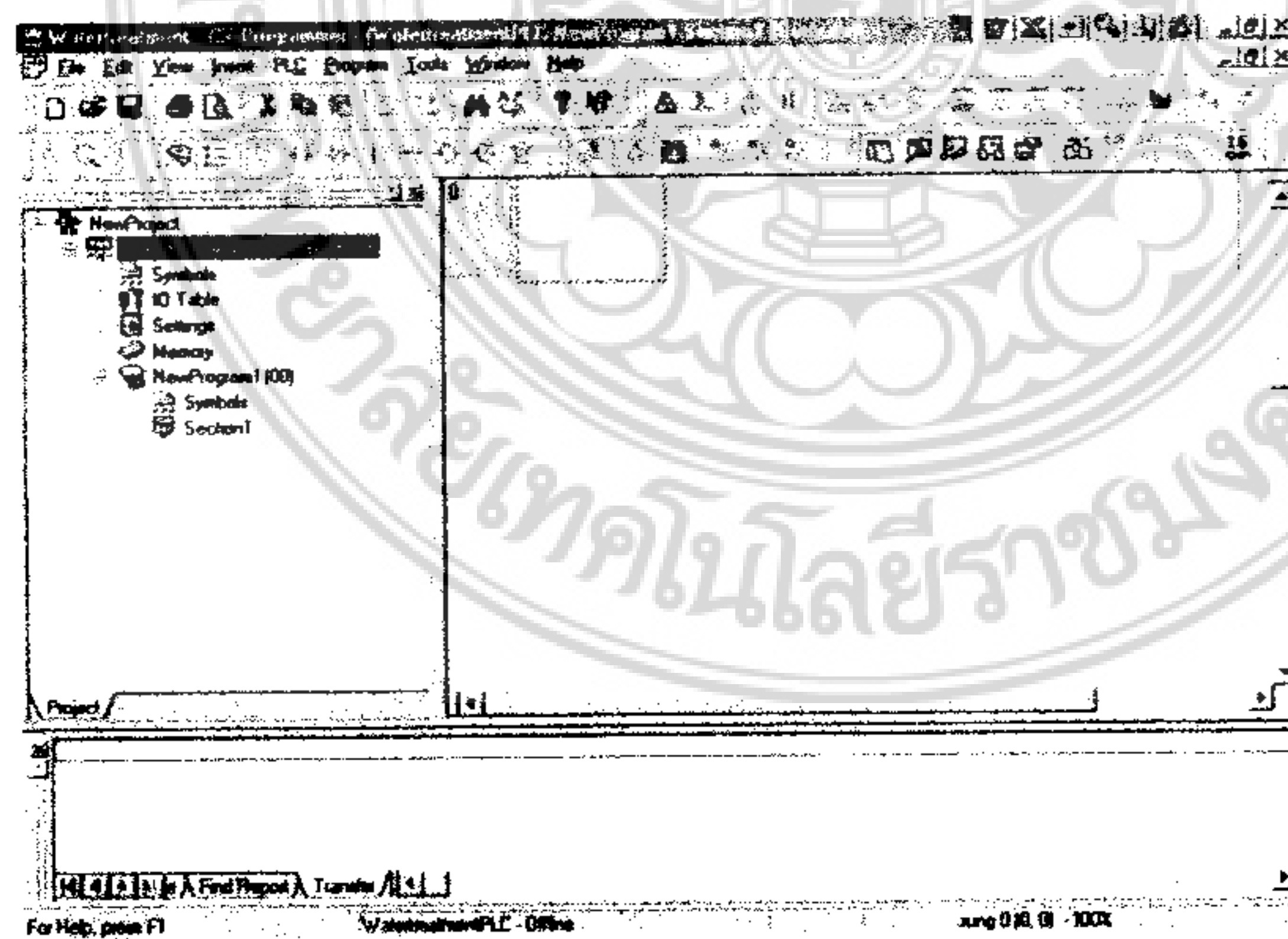


ภาพที่ 4.14 Windows ที่ชื่อ Change PLC ขึ้นมาเพื่อให้เลือกรุ่นของ PLC
ที่มา : Omron.Co.Ltd



ภาพที่ 4.15 Click ปุ่ม Setting ที่กรอบของ Network Type แล้ว click tab ที่ชื่อ driver เพื่อเลือก Com Port ที่ต่อจากเครื่อง computer ที่มา : Omron.Co.Ltd

- Project Workspace :- เป็นตัว Project Explorer จะเป็นลักษณะคล้าย windows explorer (ของ MS-windows95/98) ซึ่งเมื่อ double click ที่ icon ตัวใด ก็จะไปเปิด window ของส่วนประกอบนั้นขึ้นมา
- Editor window :- เอาไว้เขียน Program ให้ PLC ในรูปแบบเป็น Ladder Diagram หรือ Pneumonic Code (หรือเรียก Statement List, Instruction List)
- Output window :- เป็นส่วนที่รายงานผลการ compile program ว่ามี error หรือ warning หรือมีข้อผิดพลาดอะไรที่เกี่ยวข้องกับ PLC

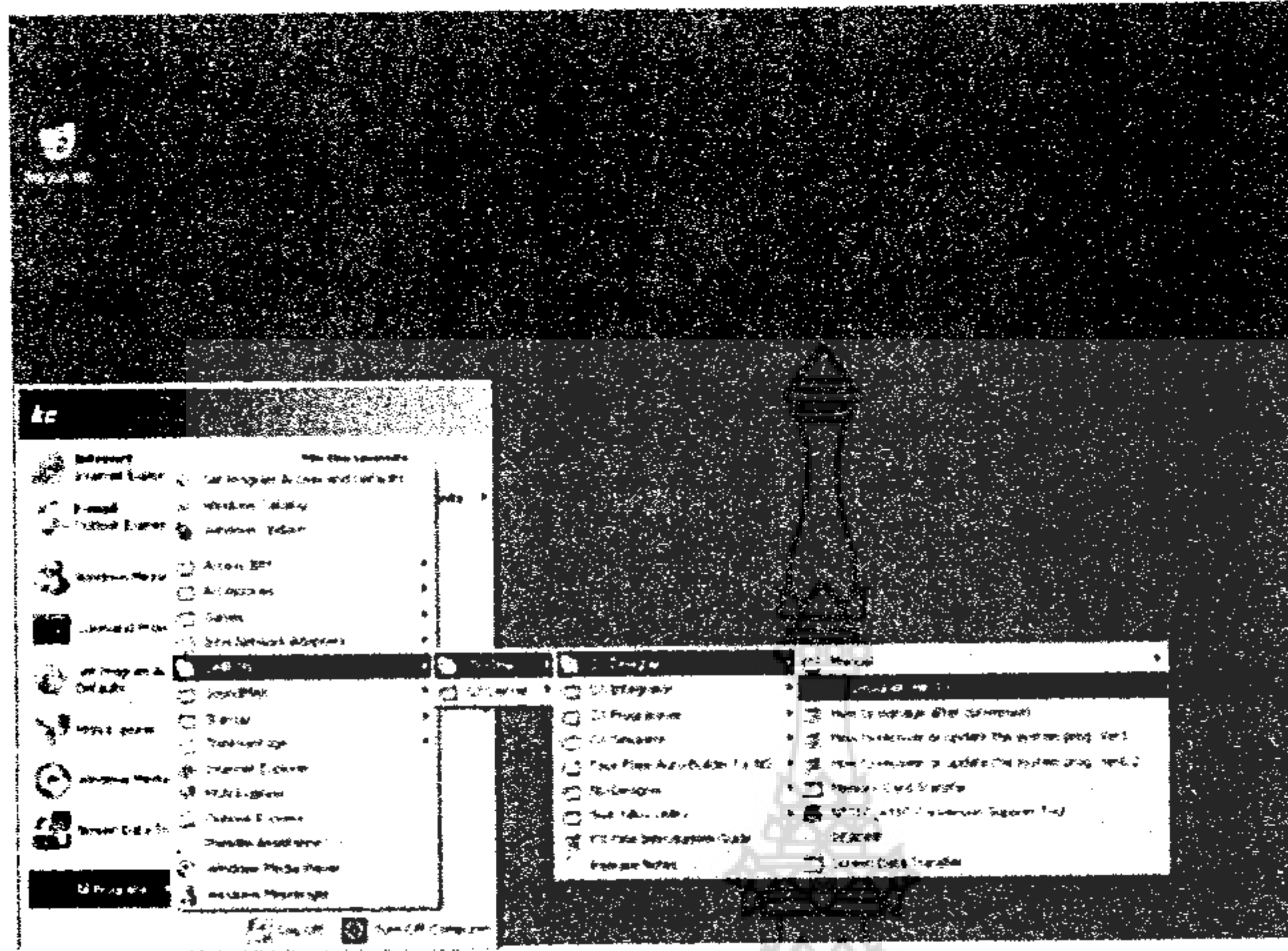


ภาพที่ 4.16 รูปแบบโปรแกรมที่ใช้ในการเขียนงานวิจัย ที่มา : Omron.Co.Ltd

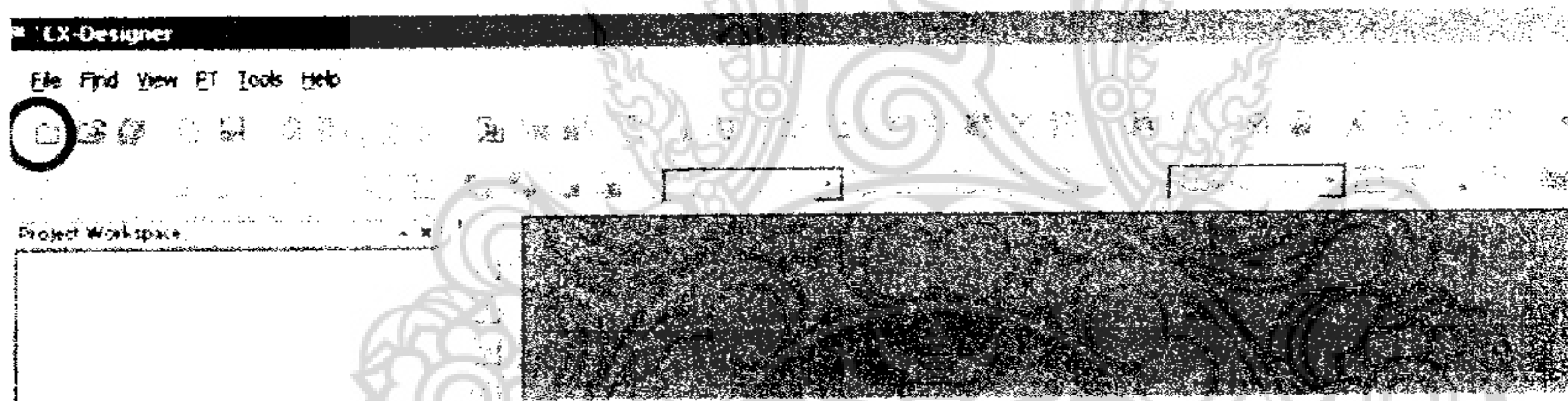


4.7.2 การเขียนโปรแกรมงานหน้าจอสั่งการ CX-Designer

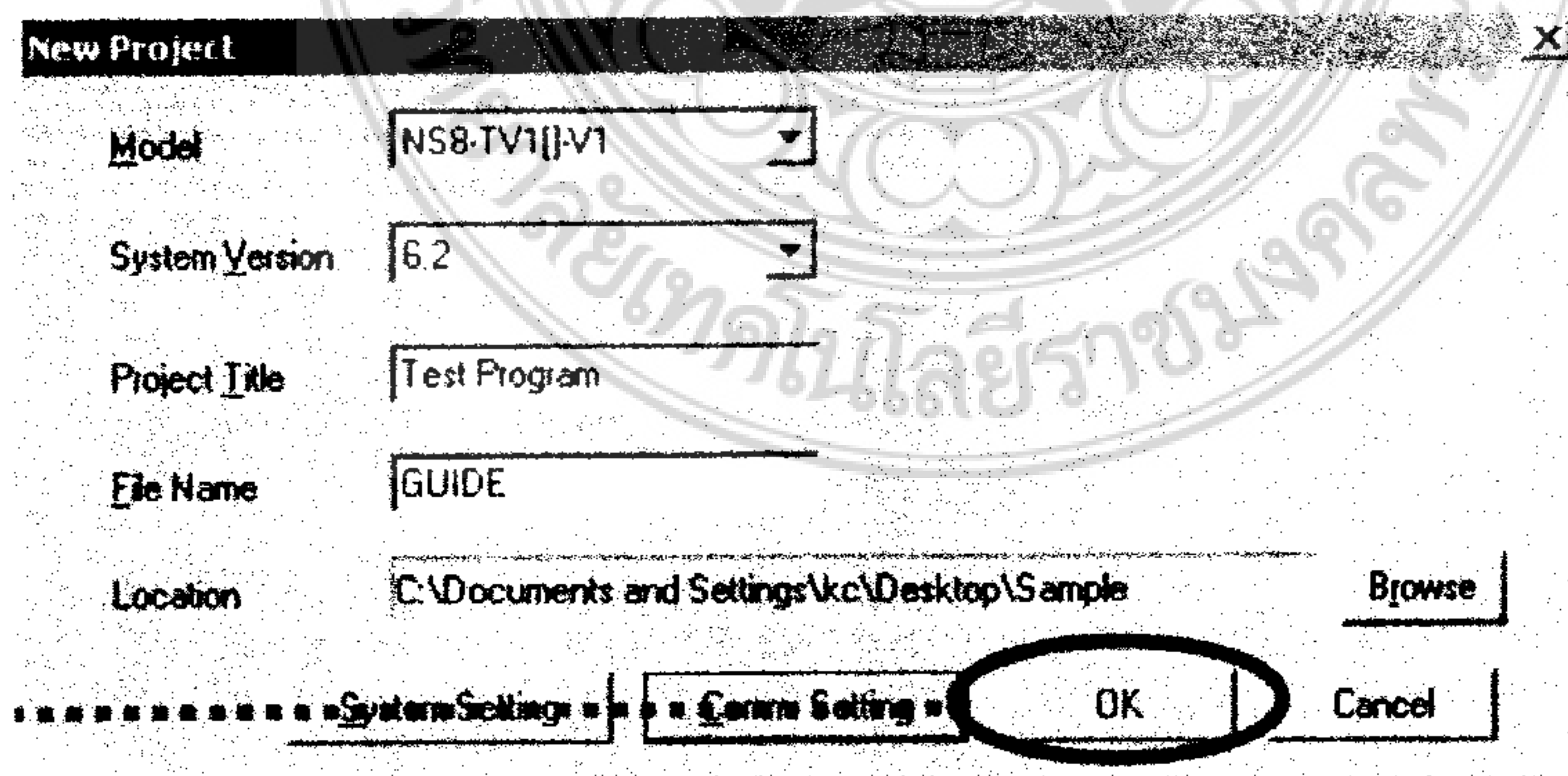
การเปิดใช้ Software CX-Designer



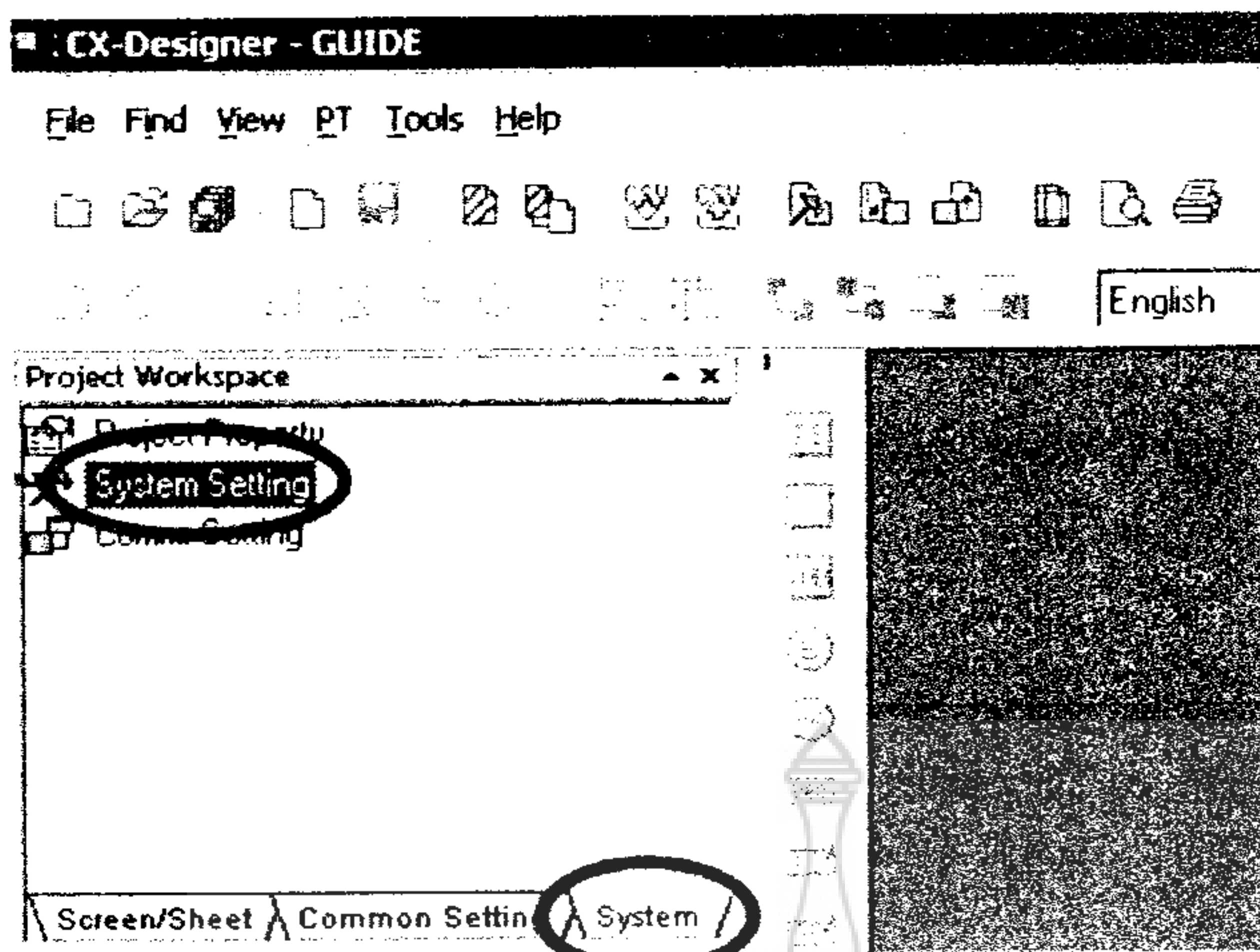
ภาพที่ 4.17 การใช้ในโปรแกรมออกแบบหน้าจอสั่งการสำหรับงานวิจัย
ที่มา : Omron.Co.Ltd



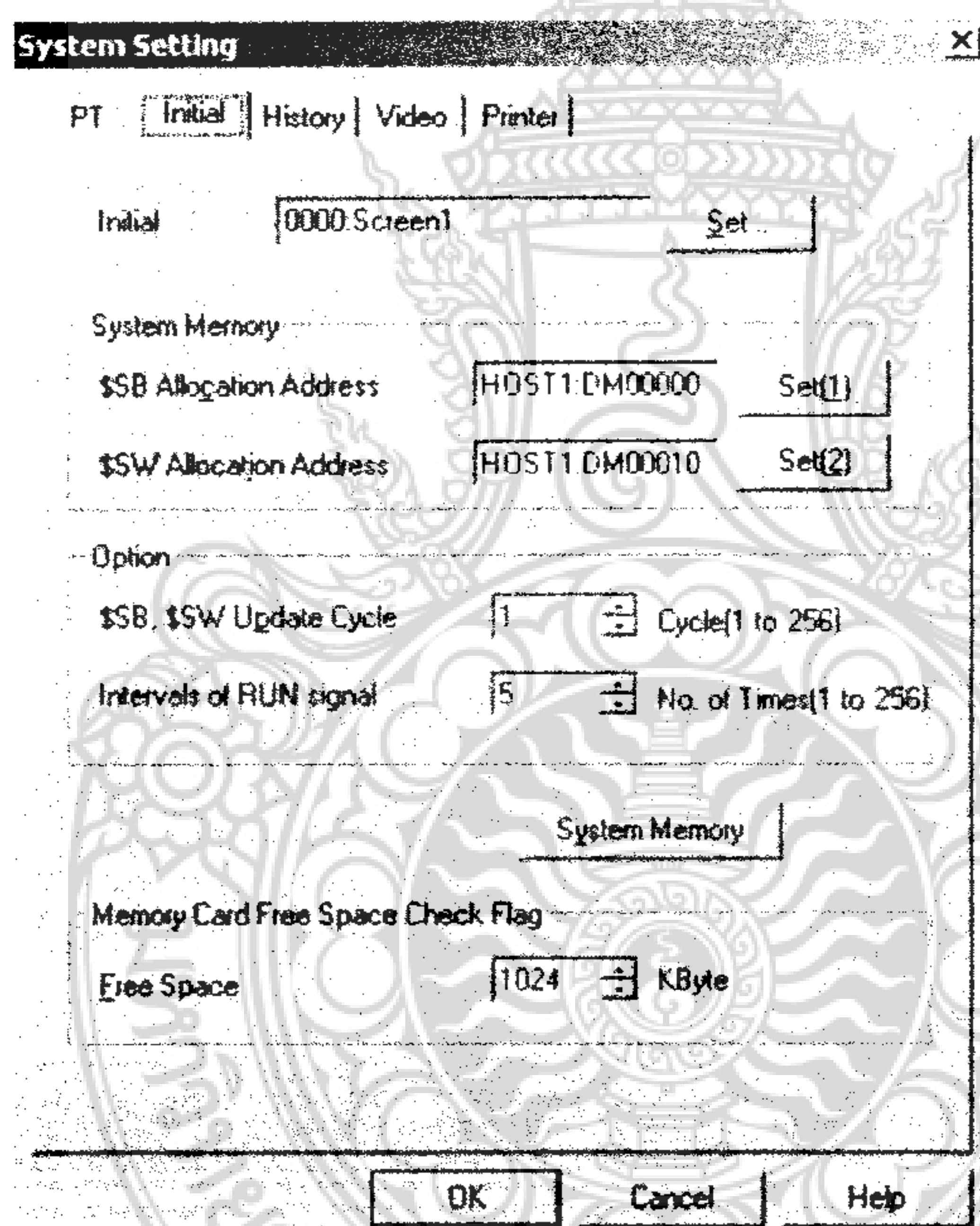
ภาพที่ 4.18 เปิดไฟล์หน้าจอสั่งการสำหรับงานวิจัย



ภาพที่ 4.19 ตั้งค่าและกำหนดพารามิเตอร์



ภาพที่ 4.20 ตั้งค่าและกำหนดพารามิเตอร์ของระบบสั่งการ
ที่มา : Omron.Co.Ltd



ภาพที่ 4.21 ตั้งค่าและกำหนดระหว่างหน่วยความจำที่กำหนด
ที่มา : Omron.Co.Ltd

บทที่ 5

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

การพัฒนาสร้างเครื่องมือเพื่อรับและจ่ายค่าการไหลของกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมเพื่อหาค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต โดยใช้การวัดค่าของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่มีค่าต่ำมาก โดยวิธีการของ 3LP device ด้วยหลักการ Potentiostat หรือ Galvanostatic ตัวอย่างที่ทดสอบใช้การจำลองสภาพแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กให้อยู่ในสถานะสิ่งแวดล้อมทะเลด้วยการใช้คลอไรด์เป็นส่วนผสมอยู่ในคอนกรีตแทนน้ำทะเลจริงและเร่งการเกิดสนิมด้วยวิธีการทางไฟฟ้าที่แรงดันแตกต่างกัน เนื่องจากมีความจำกัดในด้านระยะเวลา

5.1 การออกแบบจัดสร้างเครื่องมือวัด

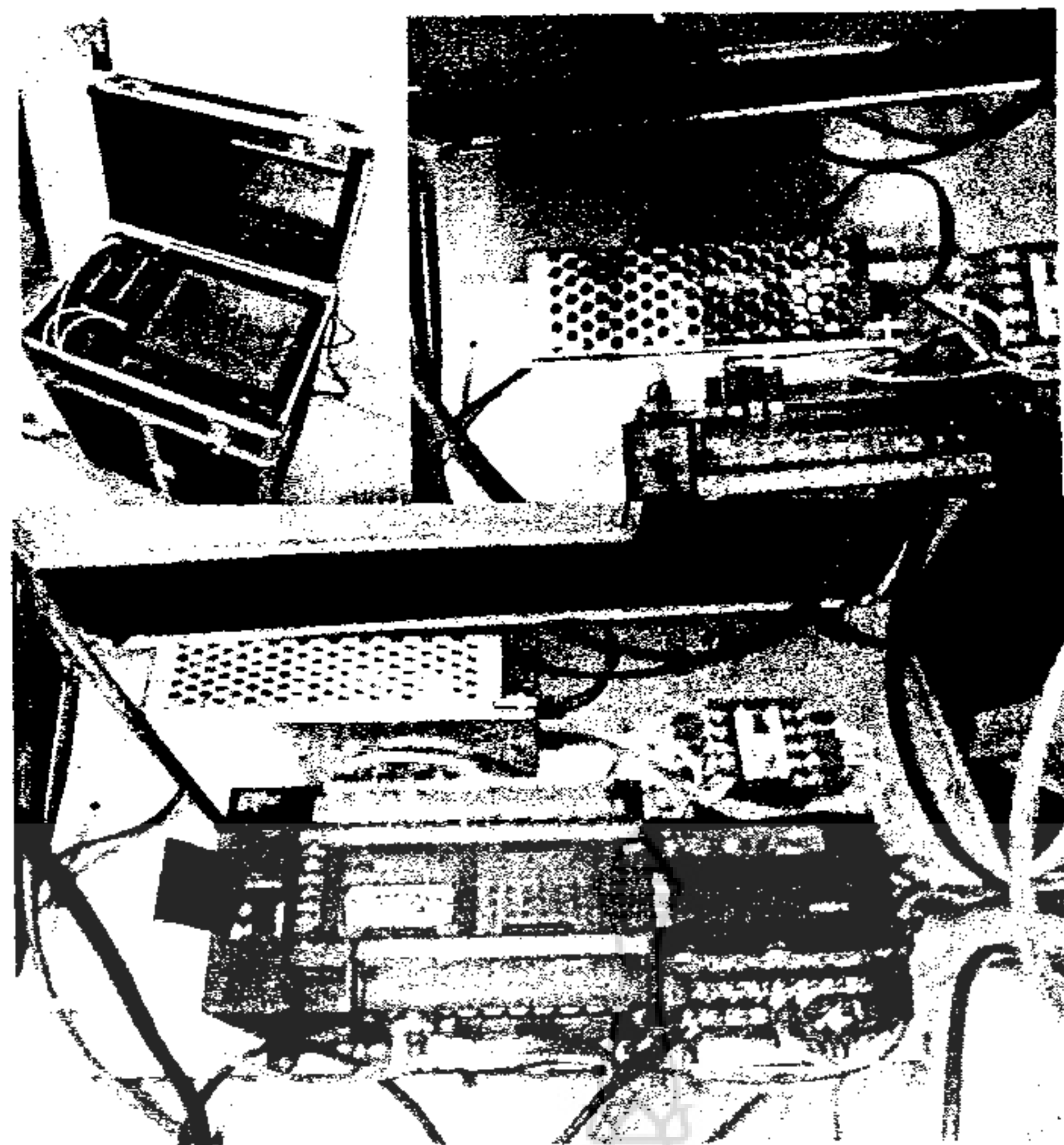
ในการจัดสร้างชุดเครื่องมือวัดค่าความเป็นสนิมเหล็กเสริมในคอนกรีตเสริมเหล็กจะจัดแบ่งตามขั้นตอนการสร้างต้นแบบดังต่อไปนี้

5.1.1 จัดหาอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้



ภาพที่ 5-1 หน้าจอสั่งการและอุปกรณ์ควบคุมที่ใช้สร้างเครื่องมือวัด





ภาพที่ 5-2 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและอุปกรณ์การรับค่าสัญญาณจากการวัด

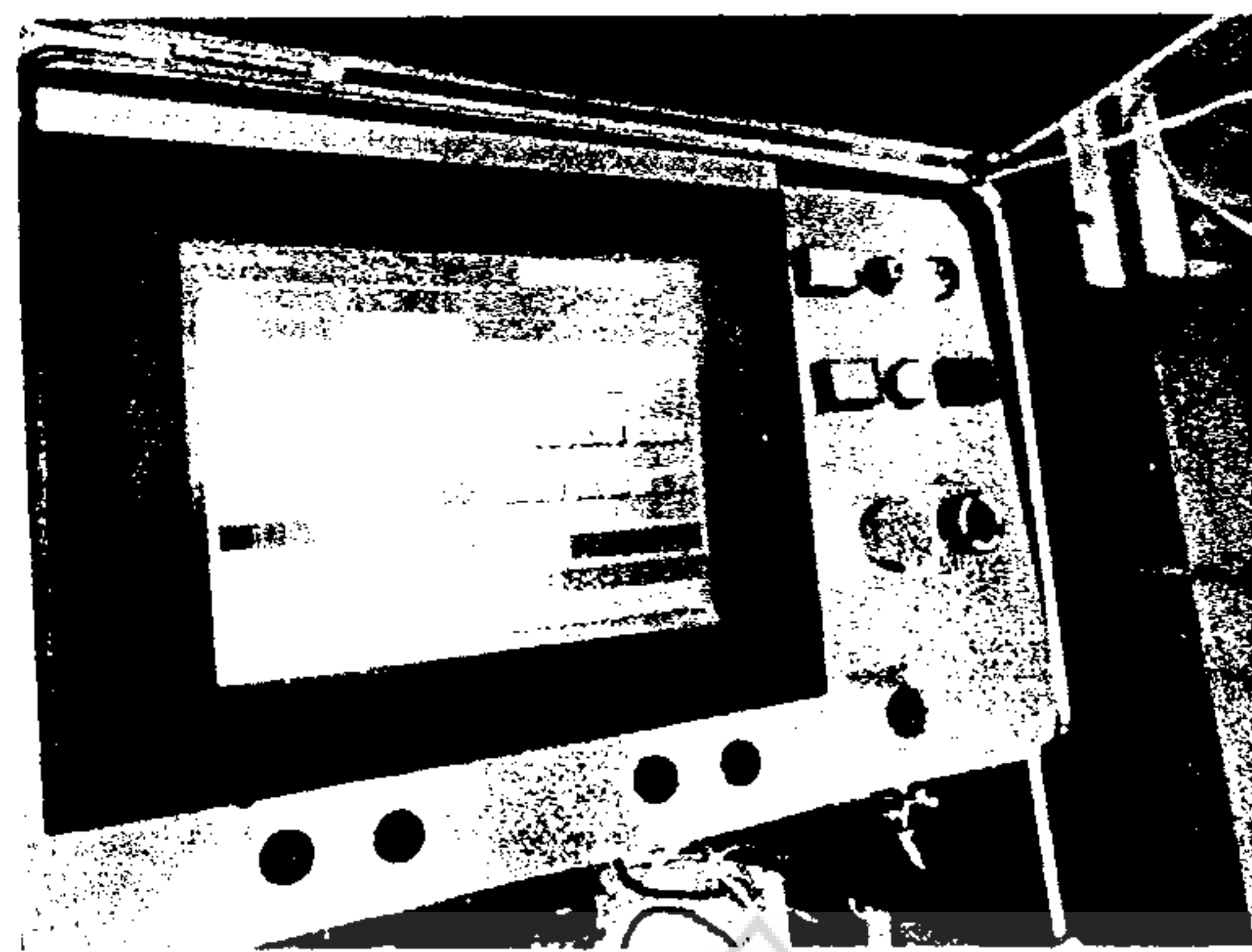
5.1.2 ออกแบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและต่อสายกับอุปกรณ์รับและส่งค่าโดยทำการต่อสายสัญญาณเข้ากับพีแอลซี



ภาพที่ 5-3 ทดสอบการทำงานของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า



ภาพที่ 5-4 การรับค่าและส่งค่าอนาล็อกเข้าสู่โปรแกรม



ภาพที่ 5-5 การรับค่าและส่งค่าออนไลน์เข้าสู่โปรแกรมจอ

5.1.3 ติดตั้งอุปกรณ์เข้าสู่ระบบการวัด



ภาพที่ 5-6 การรับค่าและส่งค่าออนไลน์เข้าสู่โปรแกรมเครื่อง

5.1.4 การเขียน โปรแกรมควบคุม



ภาพที่ 5-7 การเขียน โปรแกรมเพื่อสั่งการอุปกรณ์การวัดค่า



ภาพที่ 5-8 การเขียน โปรแกรมสั่งงานและแสดงผลการวัดค่าโพลาไลต์

5.1.5 ทดสอบการวัดและเก็บค่าโพลาไลต์เซชัน



ภาพที่ 5-9 ทดสอบการส่งสัญญาณโพลาไลต์เซชันเข้าสู่คอนกรีตเสริมเหล็ก



ภาพที่ 5-10 แสดงการทดลองการวัดและแก้ไขโปรแกรม

5.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับใช้ทดสอบเครื่องมือวัดค่าโพลาไลต์เซชัน

ประกอบด้วย เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องผสมคอนกรีตขนาดเล็กแบบขนาดความจุ 0.15 ม³
2. แบบหล่อคอนกรีตขนาด 10 x 10 x 35 ซม.
3. ถังสำหรับแช่ตัวอย่างคอนกรีต
4. อุปกรณ์วัดค่ากำลังรับแรงอัด
5. เหล็กเส้นกลมผิวเรียบผ่านศูนย์กลาง 9 มม.
6. ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1

7. มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ขนาด โดสุค 3/4"
8. ทรายละเอียด (Fine Aggregate)
9. สายสัญญาณ คววมคุม และสายลิ่งกั
10. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride, NaCl)
11. สารเคมีสำหรับเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์
12. DC Power Supply 0-30 Vdc สามารถปรับแหล่งจ่ายกระแสได้
13. Volt meter ที่มีความละเอียดในย่าน mV
14. Amp meter ที่มีความละเอียดในย่าน μA
15. สายวัดสัญญาณที่มีสารละลายตัวนำไฟฟ้า
16. โอห์มมิเตอร์ เพื่อวัดค่าความต้านทาน
17. เครื่องทดสอบการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า
18. เครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรง
19. เครื่องทดสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์
20. สารอิเล็กโทรไลต์เจลสำหรับเป็นสื่อวัดค่าความต้านทาน
21. โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (CP1L)
22. จอสั่งการ Touch Screen (NS7)
23. โมดูลแปลค่า อนาลอก เป็น ดิจิตอล
24. ชุดคววมคุมกำลังไฟฟ้า

วิธีการ

5.3 วัสดุและปฏิกษส่วนผสมคอนกรีต

1.1 วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตรีช่างของบริษัทปูนซีเมนต์ไทย
- วัสดุมวลรวมหยาบใช้หินปูนย่อยขนาด โดสุค 3/4 นิ้ว
- มวลรวมละเอียดทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (SSD)
- เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม.

1.2 ปฏิกษส่วนผสมคอนกรีต

ในการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดคอนกรีตให้มีกำลังรับแรงอัด 240 ก.ก./ซ.ม.² โดยออกแบบตามมาตรฐานของ ACI มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ w/c เท่ากับ 0.40 และค่าการยุบตัวเท่ากับ 8 ซม. โดยมีปฏิกษส่วนผสมคอนกรีตและคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้



ตารางที่ 5.1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต ต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร

วัสดุในการผสมคอนกรีต	ปริมาณน้ำหนัก(กก./ลบ.ม.)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	450
มวลรวมหยาบ	992
มวลรวมละเอียด	750
น้ำ	180
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c = 0.40)	
สารละลายโซเดียมคลอไรด์	5% , 10% และ 15% (ของน้ำหนักซีเมนต์)

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติของเหล็กเสริมคอนกรีต

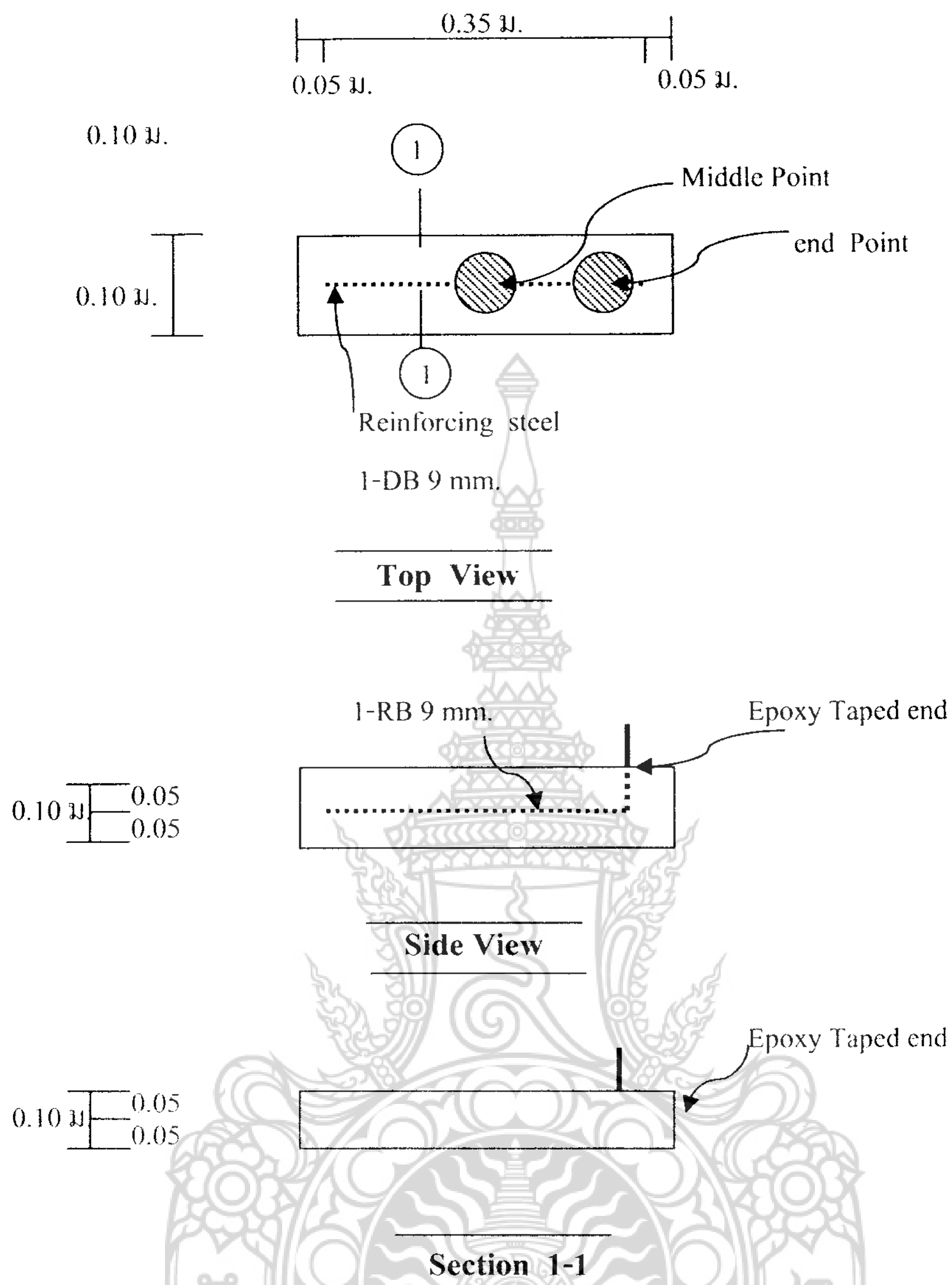
Diameter (mm.)	Cross section area (mm. ²)	Yield Strength (kg/cm. ²)	Ultimate strength (kg/cm. ²)
RB -9	28.3	2400	3900
DB-12 (SD30)	113.10	3000	4900

5.4 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก

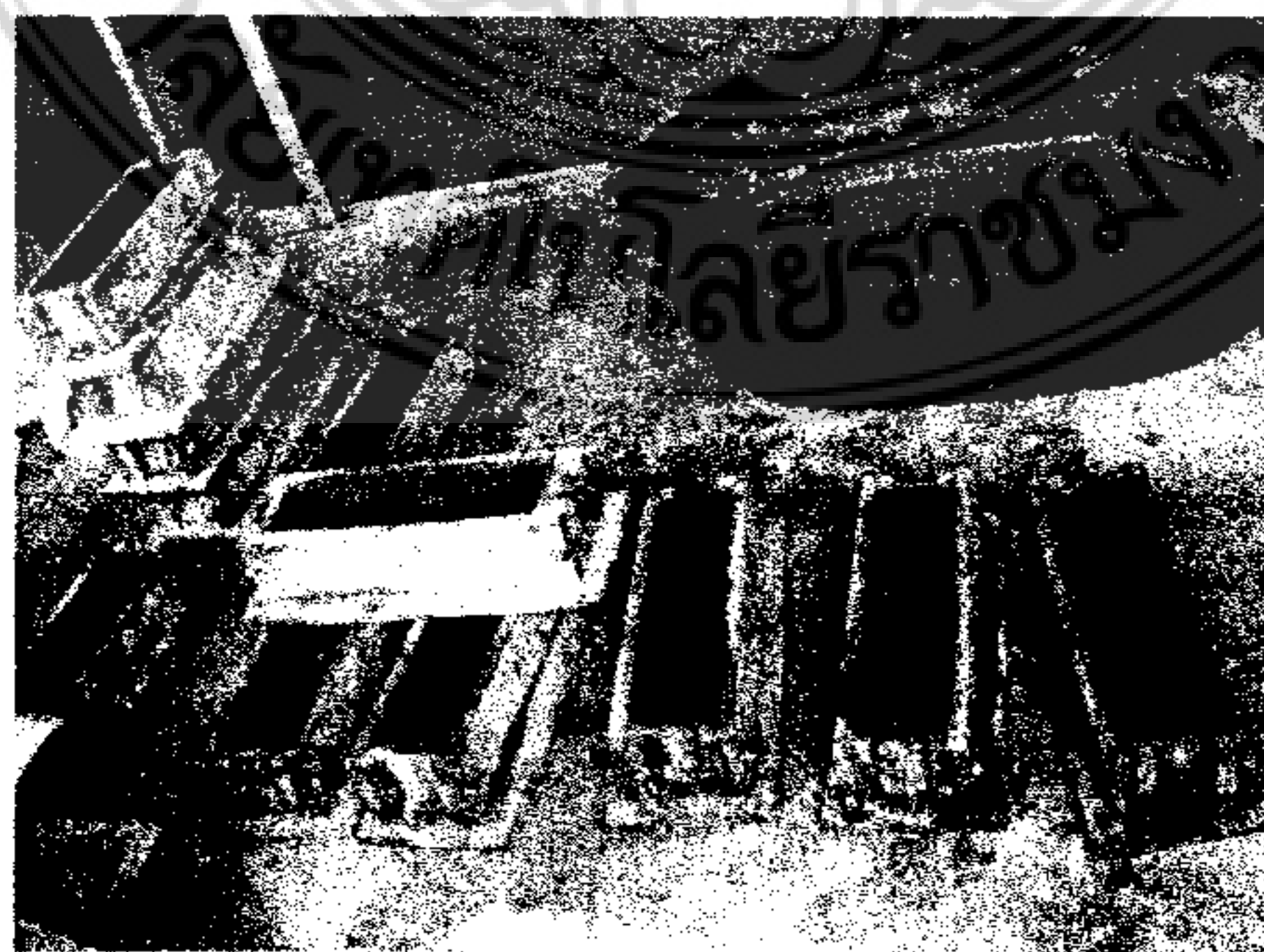
ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

จัดทำตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 10 x 10 x 35 ซม. ดังแสดงตามภาพที่ 5.1 จำนวน 12 ตัวอย่าง โดยมีปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตดังแสดงในตารางที่ 5.1 และน้ำที่ใช้ในการเตรียมคอนกรีตเป็นน้ำประปาโดยใช้เหล็กเสริมชนิด RB ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. โดยยื่นปลายเหล็กออกจากตัวอย่างเพื่อทำเป็นจุดเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้เร่งให้เหล็กเกิดสนิมและหลังเกิดกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยในการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการผสมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในอัตราส่วนร้อยละ 5 10 และ 15 ต่อน้ำหนัก เพื่อการจำลองสภาพให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กให้อยู่ในสภาวะสิ่งแวดล้อมทะเลด้วยการใช้คลอไรด์เป็นส่วนผสมอยู่ในคอนกรีตแทนน้ำทะเลจริง เนื่องจากความจำกัดด้านเวลาในการชิมผ่านของคลอไรด์ และทำการทดสอบค่ายุบตัวด้วยอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว (Slump test) โดยวิธีดังกล่าวเป็นที่ยอมรับได้ในงานวิจัยของต่างประเทศ (C. Arya et al., 1996) โดยทำการบ่มตัวอย่างในน้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นจึงจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่เหล็กเสริมเพื่อช่วยเร่งให้เหล็กเกิดสนิมเร็วขึ้น

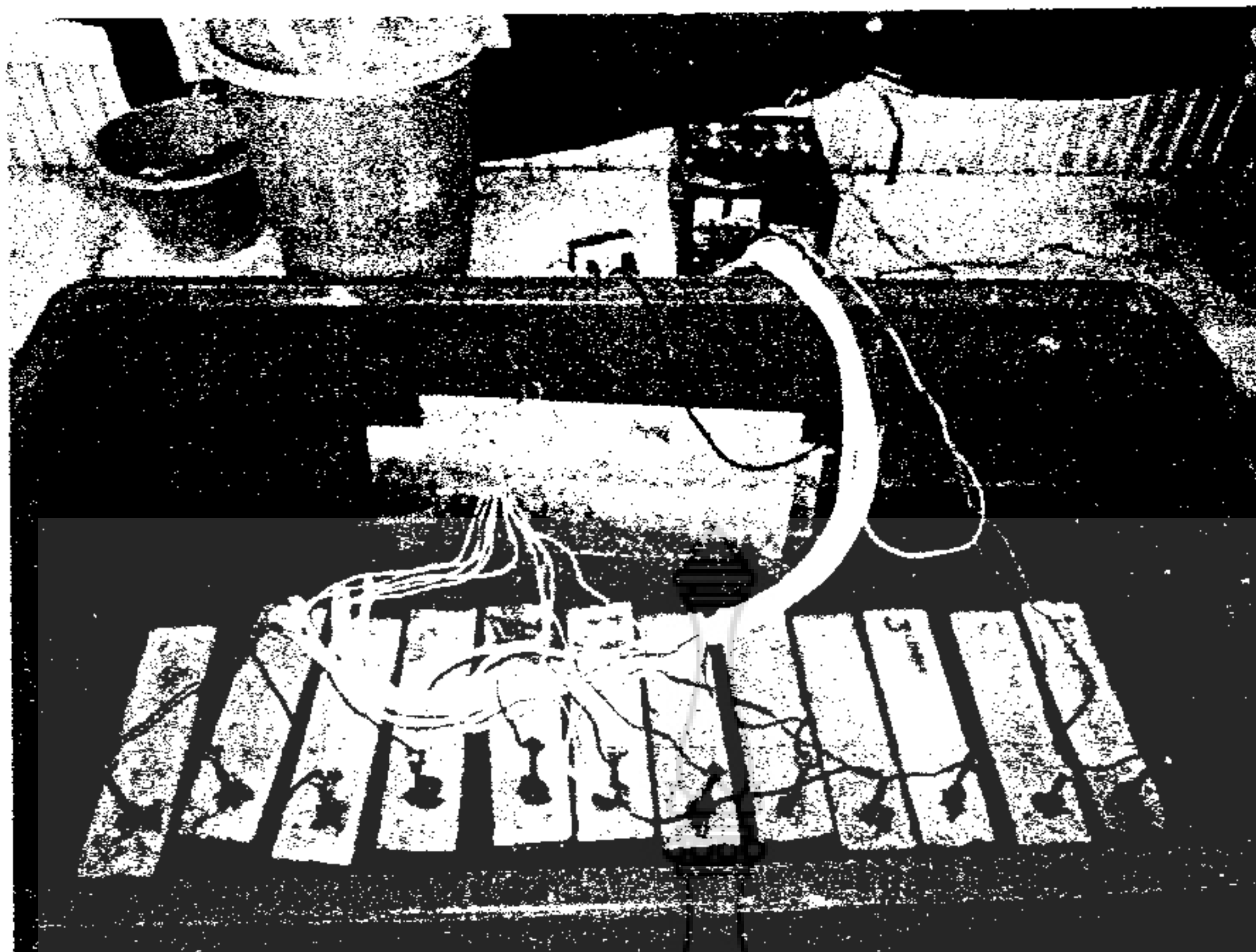




ภาพที่ 5-11 รายละเอียดคานคอนกรีตเสริมเหล็กและตำแหน่งการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า



ภาพที่ 5-12 การเตรียมแบบหล่อคานคอนกรีต

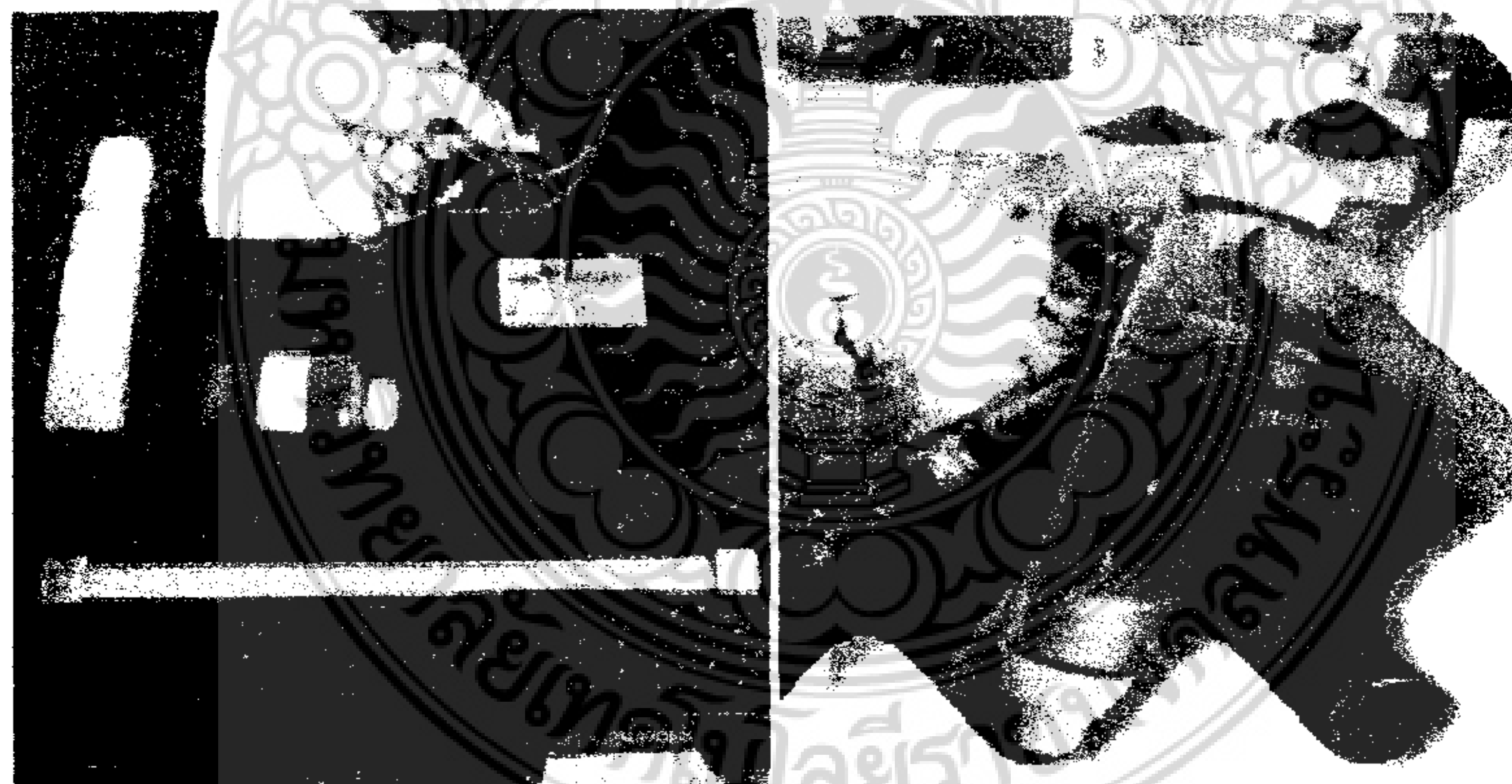


ภาพที่ 5-13 การเตรียมตัวอย่างคานคอนกรีตและการเร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า

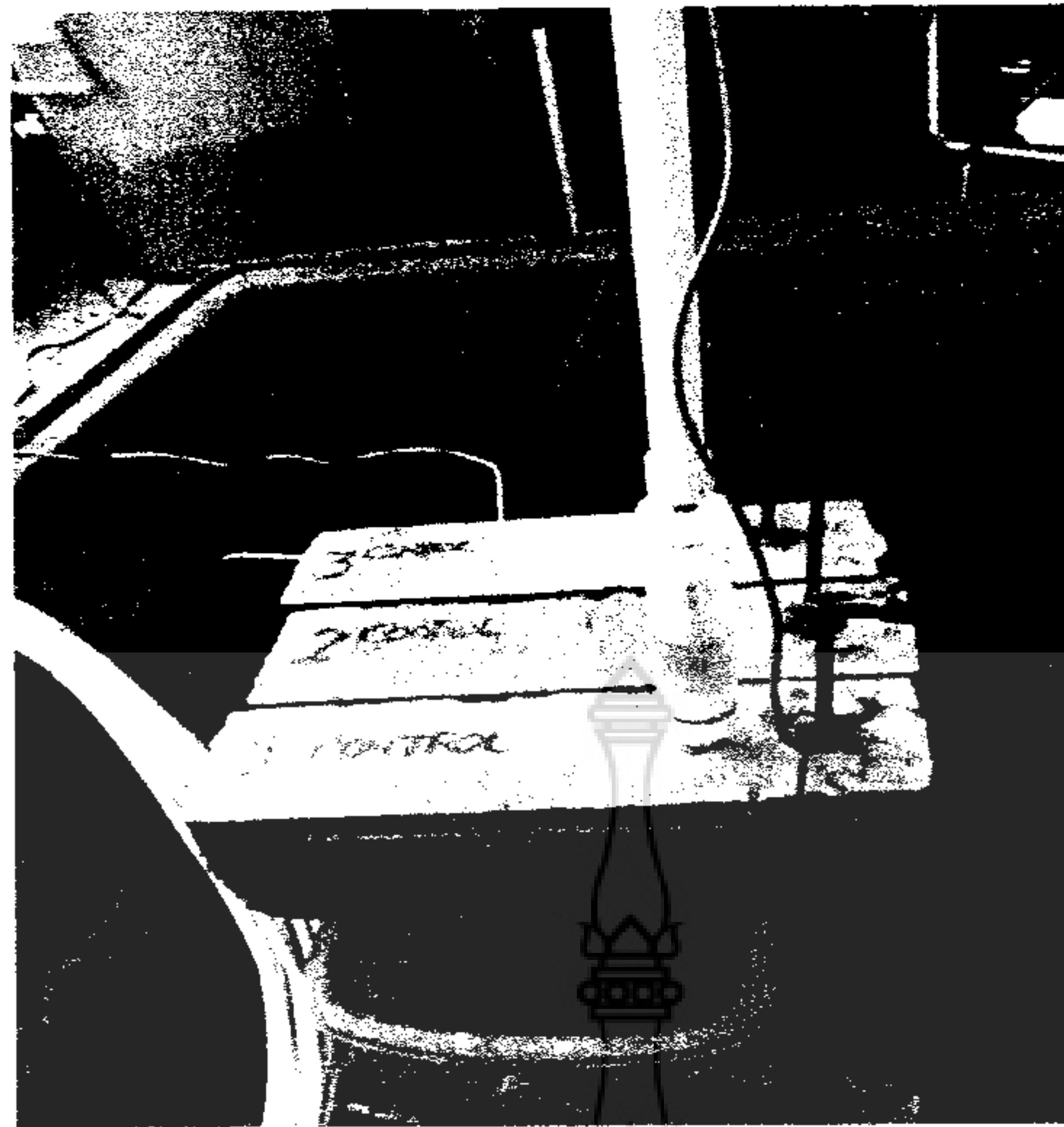
5.5 วิธีการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า

การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential) เพื่อตรวจสอบโอกาสในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคานคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM-C876 ดังภาพที่ 5-14 และ 5-15



ภาพที่ 5-14 การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือ Half-Cell สำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์



ภาพที่ 5-15 การวัดการเกิดสนิมด้วยวิธีความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งสองชุดที่ไม่ได้เร่งด้วยกระแสไฟฟ้าและชุดที่เร่งด้วยกระแสไฟฟ้า การเก็บค่าการวัดให้เก็บค่าทุกๆ 7 วันเป็นเวลา 2 เดือน และทำการเปรียบเทียบแต่ละตัวอย่างที่มีปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 5, 10, 15 และ 0 ตามลำดับของชุดตัวอย่างที่เร่งด้วยกระแสไฟฟ้าและไม่เร่งไฟฟ้า

ขั้นตอนและวิธีการวัดค่ามีดังนี้

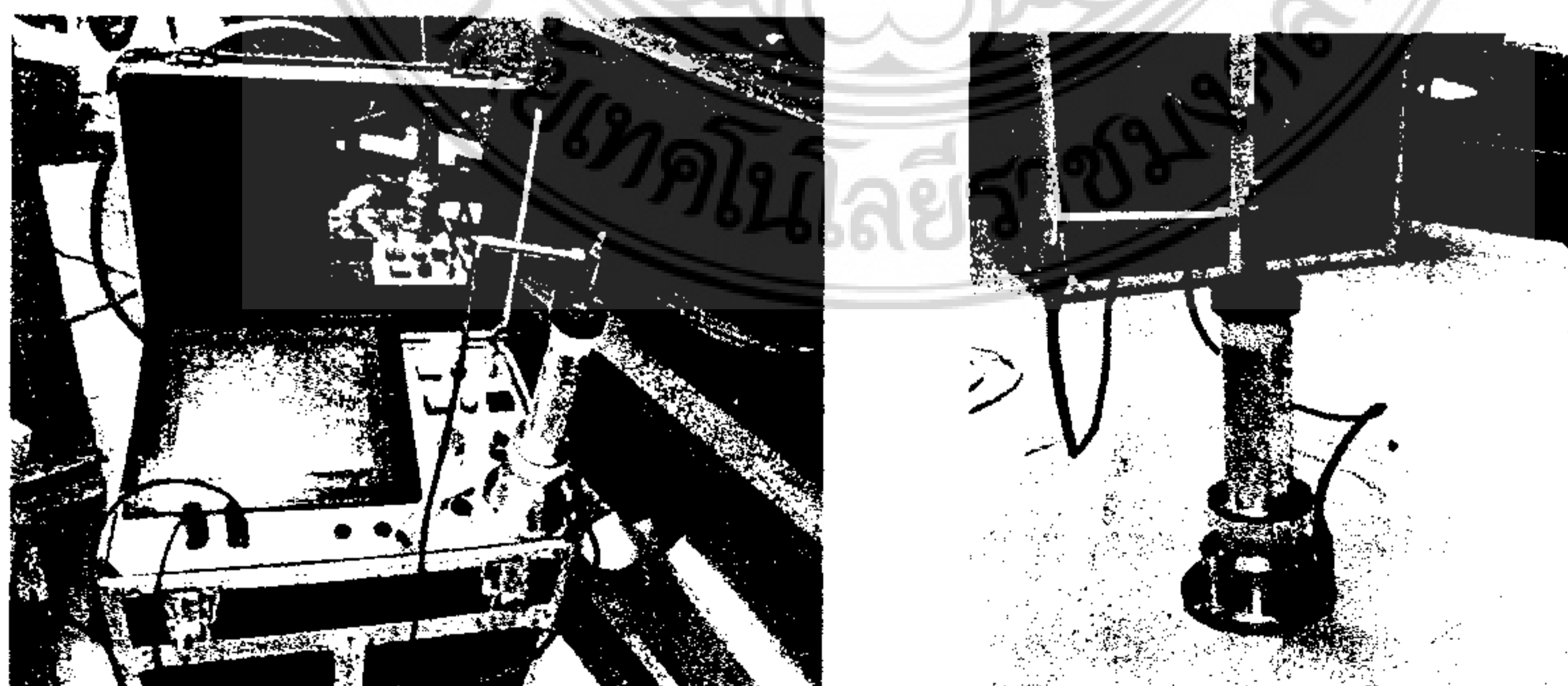
1. ทำเครื่องหมายที่ตำแหน่งต่างๆบนคานที่ต้องการทำการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ โดยกำหนดตำแหน่งตรงจุดตัดและบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริมที่มีการเชื่อมต่อกับกระแสไฟฟ้าในดังแสดงในรูปภาพที่ 5-15
2. ราดน้ำให้ทั่วคานให้ชุ่มเพื่อให้น้ำซึมเข้าไปภายในคานคอนกรีตนำผ้าชนิดหนาชุบน้ำมาคลุมไว้เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำจากคาน และรีบทดสอบทันที
3. เตรียมเครื่องมือในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของคอนกรีตด้วยวิธีครึ่งเซลล์ (Half Cell Potential) โดยใส่ Copper (II) Sulphate ลงไปในหลอดเครื่องมือโดยให้สารละลายอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ แล้วใส่น้ำลงไปในช่วงอุปกรณ์แล้วจึงประกอบอุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกัน
4. ต่อเครื่องวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เข้ากับเหล็กที่ยื่นออกมาจากคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้ขั้วลบต่อเข้ากับเหล็กเสริมและขั้วบวกต่อเข้ากับเครื่องมือวัดและนำไปวางบนตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้แล้วอ่านค่าที่ได้แล้วจดบันทึกค่าโดยหาค่าเฉลี่ย 5 ครั้งต่อการวัดค่าหนึ่งจุด

5.6 การวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์

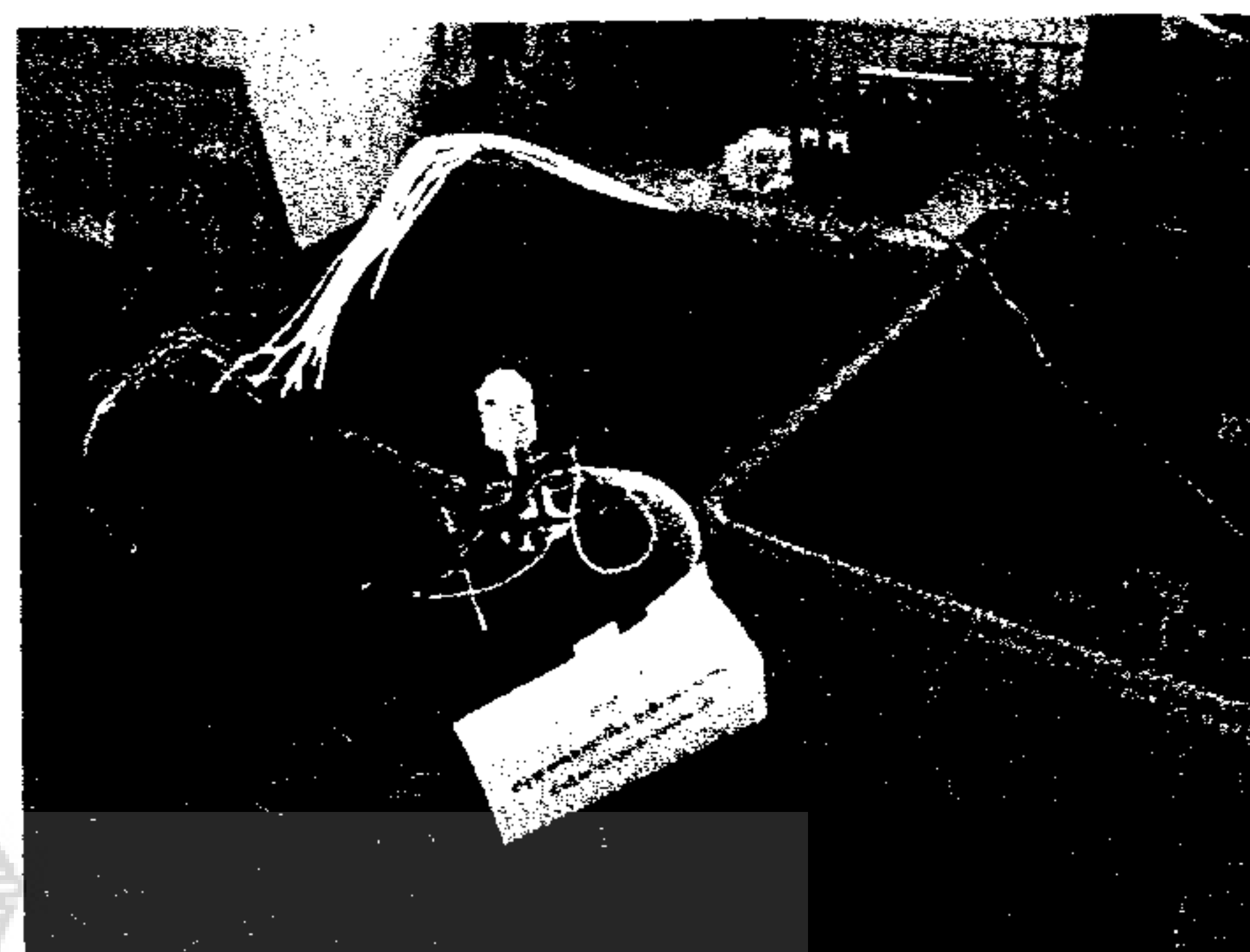
หลักการของเทคนิคความต้านทานโพลาไรซ์เป็นวิธีการที่ดีสำหรับใช้หาค่าอัตราการเกิดสนิม (Corrosion rate) ของเหล็กเสริมในคอนกรีตสอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM G-59 เป็นเทคนิคมาตรฐานของการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงใน Open Circuit Potential (OCP) ของเซลล์ตัวนำไฟฟ้าแบบ Short-Circuited เมื่อมีกระแสไฟฟ้าจากภายนอกไหลผ่านเซลล์ จะทำให้ไฟฟ้าครบวงจร ซึ่งวิธีการวัดของ LPR ในงานวิจัยนี้ใช้หลักการของ Potentio statically มีวิธีการคือเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็นช่วงทำให้ศักย์ไฟฟ้า (ΔE) เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งแปรผันไปตามค่าของกระแสไฟฟ้า (ΔI) ในขณะเวลานั้น โดยที่ค่าของแรงดันที่เปลี่ยนแปลงต้องอยู่ภายในช่วง 10-30 มิลลิโวลต์เท่านั้น ค่าที่วัดได้ถึงจะมีความถูกต้อง ซึ่งค่าเหล่านี้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (ΔE) และการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า (ΔI) ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่าง $\Delta E/\Delta I$ เรียกว่าความต้านทานโพลาไรซ์ (R_p) เพราะว่ากระแสไฟฟ้าจะแสดงในเทอมต่อหน่วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าเป็น Polarized โดยที่ (R_p) มีหน่วยเป็นโอห์มคานที (ohms.cm²) ตามมาตรฐาน ASTM G15

ขั้นตอนหลักในการใช้งานเครื่องมือ ในการวัดความต้านทาน Polarization ใน Potentiostatic Mode ดังต่อไปนี้

1. ทำการเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้ากับเหล็กเสริม(WE) ของแกนตรงปลายเหล็กที่ยื่น ดังแสดงในภาพที่ 28
2. กำหนดบริเวณเหล็กเสริมสำหรับวัดค่าการเกิดสนิม โดยให้ผิวคอนกรีตอยู่ในสภาพที่เปียกและกำหนดตำแหน่งเครื่องมือให้อยู่ตรงกึ่งกลางเหนือเหล็กเสริมที่ต้องการทดสอบ
3. ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ในสภาพเปียกชื้นตลอดเวลาในการวัดค่า
4. วัดค่า Open Circuit Potential, E_o จะมีความสัมพันธ์กับ Reference electrode ในตัวอย่างเป็นการวัดแบบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ตามภาพที่ 5-16



ภาพที่ 5.16 การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือโดยใช้วิธีความต้านทานโพลาไรซ์



ภาพที่ 5.17 การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือโดยใช้วิธีความต้านทานโพลาไรซ์

5. ทำการวัดกระแสไฟฟ้าจาก CE ไปยัง WE โดยใช้แรงดันที่มีความแตกต่างกันอยู่ในช่วงไม่เกิน -10 ถึง -30 mV ในการเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าของ WE โดยเพิ่มแรงดันให้อยู่ในอัตราเท่าๆกัน บันทึกค่าของศักย์ไฟฟ้า (E) ที่จ่ายไปและบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่อ่านค่าได้ในขณะนั้น
6. ทำซ้ำตามขั้นตอนเดิมโดยเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันอย่างน้อย 5 ครั้ง เพื่อค่าไปคำนวณหาค่าความชันของเส้นตรง (Slope) เป็นค่าความต้านทาน Polarization (R_p) ที่ตรงตำแหน่งนั้น ในขณะที่หากความชันที่คำนวณได้ไม่เป็นเส้นตรงให้ปรับแก้ค่าในช่วงนั้นโดยการวัดค่าใหม่
7. คำนวณหาคานที่ของเหล็กเสริมที่มีผลกระทบกับการวัดค่ากระแสไฟฟ้าโดยดูจากคานที่ของเหล็กเสริมที่อยู่ใต้ Prob โดยอ้างอิงจากเส้นผ่านศูนย์กลางของ Prob นำมาคำนวณหาคานที่ผิวของเหล็กเสริม
8. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (E) กับกระแสไฟฟ้า (I) ต่อหน่วยคานที่ของเหล็กและหาค่าความชันของเส้นตรง (Slope) เป็นค่าความต้านทาน Polarization (R_p)
9. คำนวณหาค่าอัตราการเกิดสนิม (i_{corr}) โดยพิจารณาจากค่า สัมประสิทธิ์ B ส่วนด้วยความต้านทาน Polarization (R_p) โดยที่ค่า $B = 26 \text{ mV}$
10. นำค่าอัตราการเกิดสนิม (i_{corr}) ที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับเงื่อนไขของสถานะของเกิดสนิม โดยพิจารณาจาก $i_{orr} < 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ แสดงถึงสถานะที่เหล็กยังไม่เกิดสนิม และหาก $i_{orr} > 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ แสดงถึงสถานะที่เหล็กเกิดสนิมแล้ว (C.Andrade, M.C.Alonso. et al,1990)

บทที่ 6

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

6.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

จากผลการทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่จำลองอยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์โดยนำค่าที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐาน ASTM C 876 ดังตารางที่ 6-1 และโดยมีเงื่อนไขขอบเขตของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กถูกจำลองให้อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเลได้ถูกกำหนดให้มีส่วนผสมของปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 0% 5% 10% และ 15% ของน้ำหนักซีเมนต์ตามลำดับ ตัวอย่างแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบ่งออกเป็น 2 ชุดคือชุดแรกกำหนดให้เร่งการเกิดสนิมด้วยวิธีการใช้กระแสไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 8 โวลต์และชุดที่สองกำหนดให้ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าสำหรับวิธีการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากำหนดให้วัดตรงบริเวณมุมเหล็กเสริมและบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริมซึ่งเป็นเหล็กเสริมที่เหมือนกันดังผลการทดสอบตามตารางที่ 6-1 ถึงตารางที่ 6-5

ตารางที่ 6.1 ค่าความต่างศักย์ของไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความน่าจะเป็นการกัดกร่อน ASTM C 876

Half-Cell Potential (mV)	Percentage Chance of active Corrosion
< -350	90 %
-200 to -350	50 %
> -200	10 %

ตารางที่ 6.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล

ค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่บริเวณจุดมุมของเหล็กเสริม							
ไม่มีการเร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า							
เวลา เงื่อนไข	ระยะเวลา (สัปดาห์)						
	0	1	2	3	4	5	6
Control	-521	-569	-608	-593	-538	-498	-457
5% Cl ⁻	-675	-647	-636	-613	-601	-611	-481
10% Cl ⁻	-760	-707	-642	-656	-521	-587	-550
15% Cl ⁻	-781	-772	-656	-663	-548	-649	-474



ตารางที่ 6-3 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล

ค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่บริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม							
ไม่มีการเร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า							
เวลา เดือน/ปี	ระยะเวลา (สัปดาห์)						
	0	1	2	3	4	5	6
Control	-604	-594	-620	-606	-526	-497	-465
5% Cl ⁻	-632	-662	-632	-613	-604	-624	-499
10% Cl ⁻	-702	-712	-655	-469	-545	-597	-552
15% Cl ⁻	-762	-772	-669.4	-673	-558	-651	-482

ตารางที่ 6.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล

ค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่บริเวณจุดตัดกันของเหล็กเสริม							
ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิม							
เวลา เดือน/ปี	ระยะเวลา (สัปดาห์)						
	0	1	2	3	4	5	6
Control	-367	-357	-535	-469	-550	-689	-669
5% Cl ⁻	-1027	-1037	-1089	-1056	-892	-1034	-1038
10% Cl ⁻	-1085	-1095	-945	-872	-740	-811	-694
5% Cl ⁻	-1068	-968	-1168	-1110	-868	-787	-757

ตารางที่ 6-5 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล

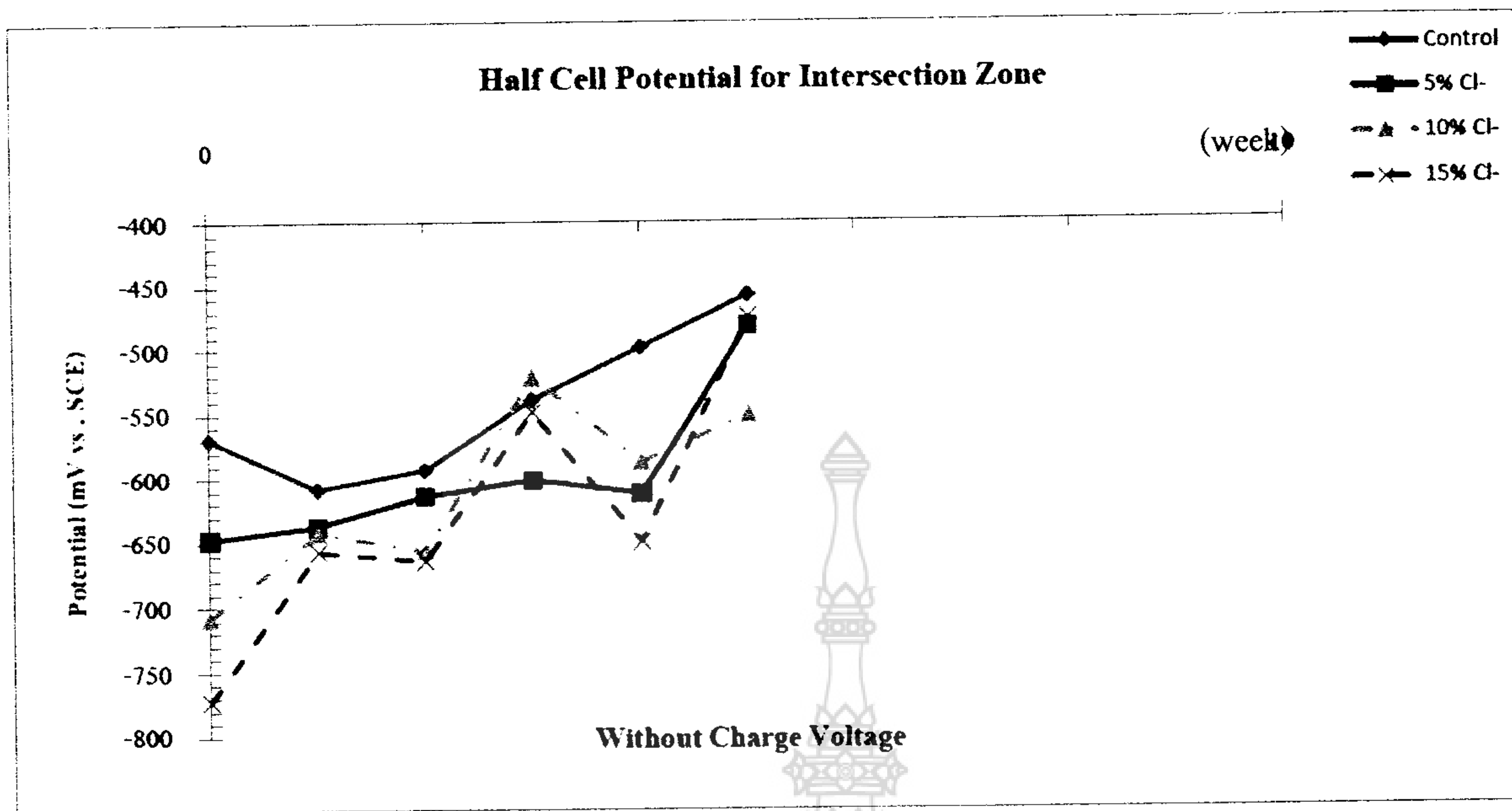
ค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่บริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม							
ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิม							
เวลา เดือน/ปี	ระยะเวลา (สัปดาห์)						
	0	1	2	3	4	5	6
Control	-434	-444	-540	-496	-536	-688	-659
5% Cl ⁻	-937	-915	-1085	-999	-870	-1026	-1084
10% Cl ⁻	-1046	-1094	-928	-831	-757	-811	-700
15% Cl ⁻	-1060	-960	-1161	-1110	-875	-818	-713



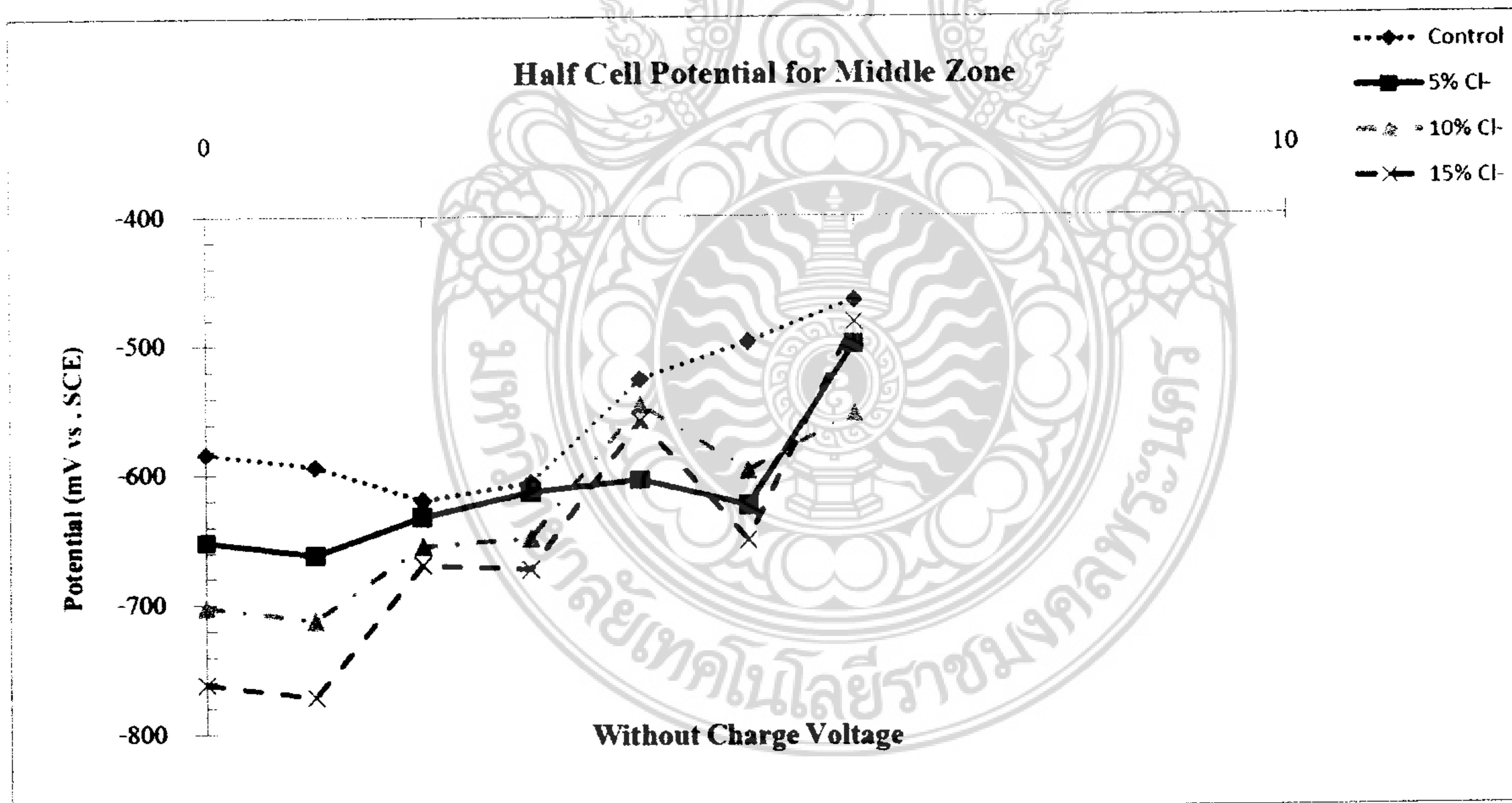
จากผลการทดสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กตามตารางที่ 6-1 ถึง 6-12 ของคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าและไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในแผ่นคานคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่มีคลอไรด์เป็นส่วนผสมที่ร้อยละ 5% 10% และ 15% ตามลำดับที่อายุของคอนกรีต 0 1 2 4 5 และ 6 สัปดาห์ตามลำดับ โดยทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งเดียวกันทุกครั้งทั้งบริเวณจุดมุมของเหล็กเสริมและบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม พบว่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ทุกตัวอย่างที่วัดค่าได้มีค่าติดลบสูงมากกว่า -350 mV ที่ระยะเวลาเริ่มตั้งแต่ 3 สัปดาห์ ทุกตัวอย่างมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันแสดงให้เห็นว่าเหล็กเสริมมีความน่าจะเป็นที่จะมีโอกาสเกิดสนิมสูงถึง 90% อ้างอิงจากตารางที่ 6-1 ดังแสดงในภาพที่ 6-1 ถึง 6-4 เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาการบ่มของแผ่นคานของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นแนวโน้มของค่าศักย์ไฟฟ้าไม่แปรผันไปตามระยะเวลาและเมื่อพิจารณาถึงแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มการเกิดสนิมสูงกว่าตัวอย่างแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เร่งด้วยกระแสไฟฟ้า เนื่องจากเหล็กเสริมที่เร่งด้วยกระแสไฟฟ้าสูญเสียอิเล็กตรอนมากกว่า และในกรณีของบริเวณตำแหน่งที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์แตกต่างกันที่จุดตัดและตรงกลางของเหล็กเสริมให้ค่าความต่างศักย์ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน

จากผลการทดสอบวัดค่าดังแสดงในภาพที่ 6-2 ถึง 6-5 เมื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของตัวอย่างแผ่นคานคอนกรีตที่ไม่ได้เร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่มีส่วนผสมของคลอไรด์เมื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าตรงบริเวณจุดตัดกันและตรงกลางของเหล็กเสริมพบว่า แผ่นคานคอนกรีตที่มีเปอร์เซ็นต์ของคลอไรด์ในส่วนผสมที่มีค่าสูงจะมีแนวโน้มของการเกิดสนิมสูงกว่าโดยไม่แปรผันไปตามเวลาทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากผลกระทบจากปัจจัยที่หลากหลายเช่น ปริมาณความชื้นที่ไม่เพียงพอมีผลทำให้คอนกรีตมีความต้านทานสูงค่าความต่างศักย์จะต่ำ ความหนาของคอนกรีต กานผิวของคอนกรีตมีความต้านทานสูงมีผลทำให้ค่าความต่างศักย์ตรงจุดนั้นมีค่าต่ำ บริเวณผิวโดยรอบเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจะมีความต้านทานสูงจะมีผลกระทบต่อค่าความต่างศักย์ที่ทำการวัดค่าในขณะนั้น สาเหตุทั้งหมดดังที่กล่าวมานี้มีผลต่อการตัดสินใจในการประเมินการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง

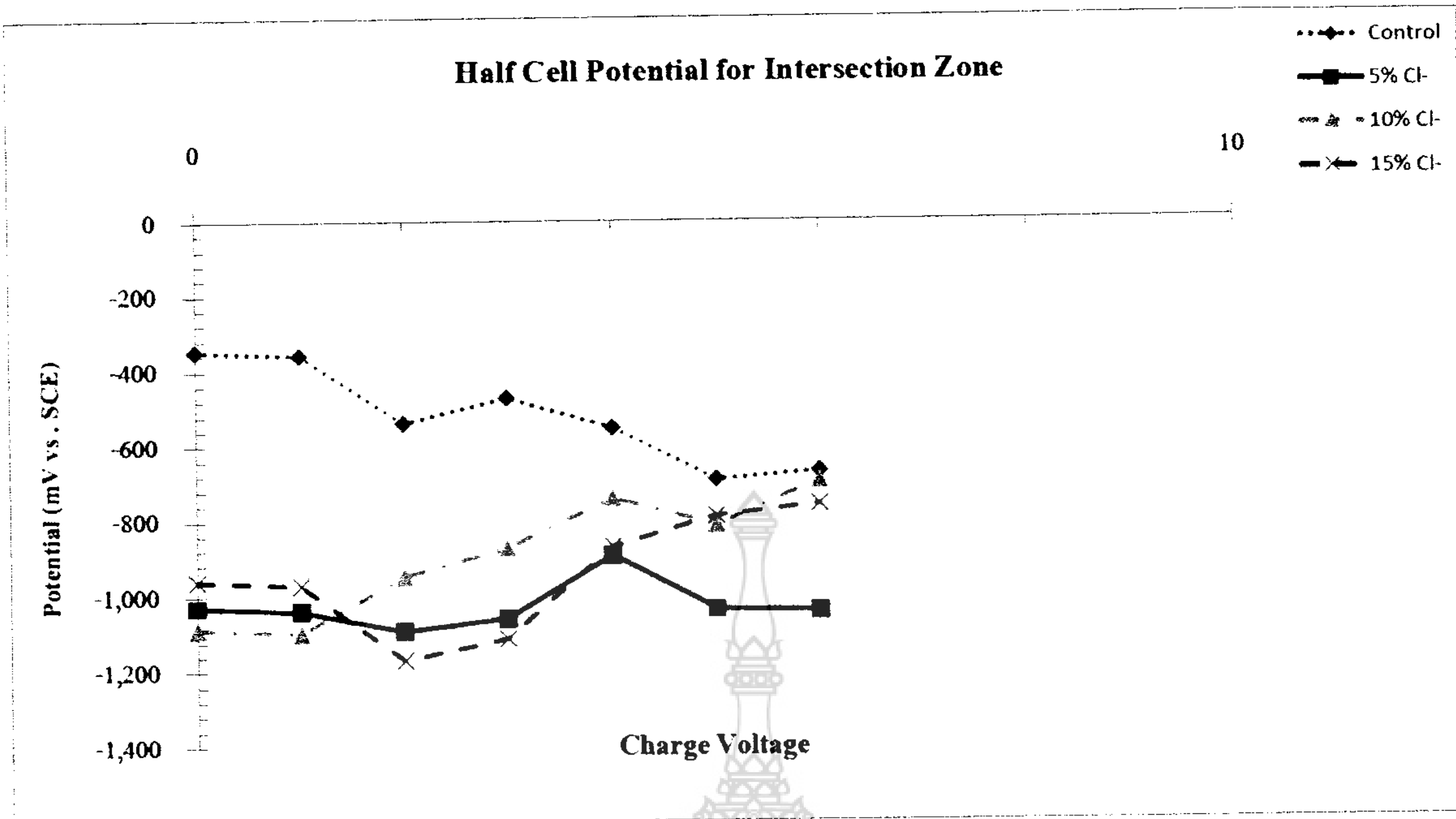




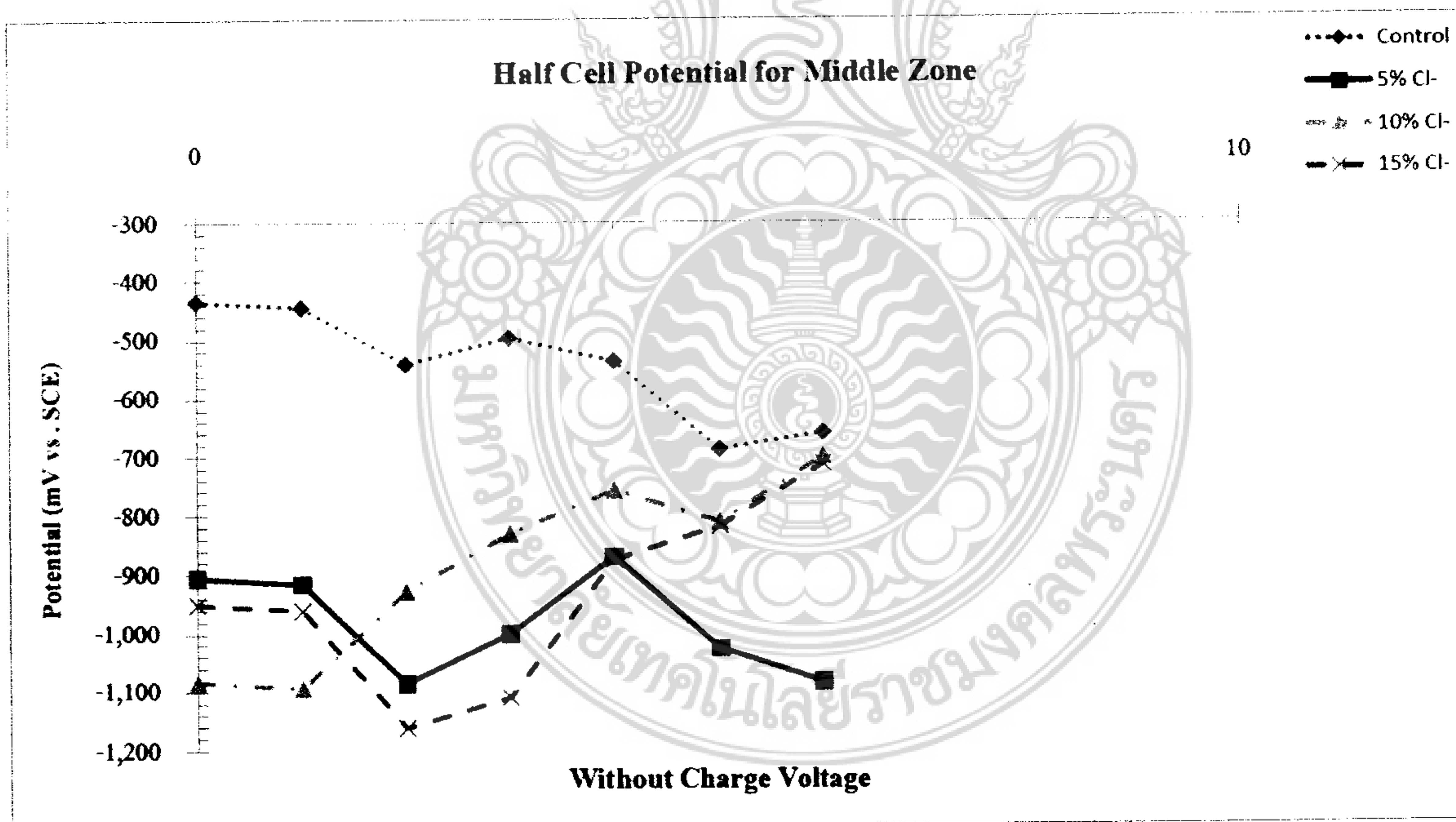
ภาพที่ 6-1 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ไม่เร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งจุดมุมของเหล็กเสริม โดยวิธีการของ Half-Cell Potential



ภาพที่ 6-2 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ไม่เร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งตรงกลางของเหล็กเสริม โดยวิธีการของ Half-Cell Potential



ภาพที่ 6-3 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้
กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งจุดมุมของเหล็กเสริมโดยวิธีการของ
Half-Cell Potential



ภาพที่ 6-4 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้
กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมบริเวณตำแหน่งจุดมุมของเหล็กเสริมโดยวิธีการของ
Half-Cell Potential

6.2 ค่าความต้านทานโพลาไรซ์เชิงเส้น (R_p)

หลักการของเทคนิคความต้านทานโพลาไรซ์เป็นวิธีการสำหรับใช้หาค่าอัตราการเกิดสนิม (Corrosion rate) ของเหล็กเสริมสอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM G-59 เป็นวิธีการหาค่ากระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมเพื่อนำเอาไปคำนวณหาอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งจากงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการของ Linear polarization resistance (LPR) เป็นหลักการของ Potentiostatically ทำได้โดยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็นช่วงทำให้ศักย์ไฟฟ้า (ΔE) เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งแปรผันไปตามค่าของกระแสไฟฟ้า (ΔI) ซึ่งค่าเหล่านี้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (ΔE) และการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวของขั้วไฟฟ้า (ΔI) ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่าง $\Delta E/\Delta I$ เรียกว่าความต้านทานโพลาไรซ์ (R_p) มีหน่วยเป็น โอห์มพื้นที่ (ohms.cm^2)

จากการผลการทดสอบค่าที่คำนวณได้ของค่าความต้านทานโพลาไรซ์เชิงเส้น (R_p) ดังแสดงในตารางที่ 6-5 ถึง 6-9 เมื่อพิจารณาความต้านทานโพลาไรซ์ ในกรณีไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิม และวัดค่าความต้านทานที่บริเวณจุดตัดกันและบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริมดังแสดงตามภาพที่ 6-5 ถึง 6-8 เมื่อพิจารณาตัวอย่างคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่มีเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมของคลอไรด์เพิ่มมากขึ้นพบว่าค่าความต้านทานโพลาไรซ์มีแนวโน้มลดลงตามลำดับ ทั้งบริเวณตำแหน่งจุดตัดกันและตรงกลางเหล็กเสริม โดยที่คอนกรีตควบคุมจะให้ค่าความต้านทานโพลาไรซ์ที่สูงกว่าทุกตัวอย่าง ทั้งนี้ไม่แปรผันไปตามระยะเวลาที่ทำการทดสอบวัดค่า และเมื่อพิจารณาในกรณีใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมตามพบว่าให้ค่าความต้านทานโพลาไรซ์มีแนวโน้มสอดคล้องกันแต่ค่าความต้านทานโพลาไรซ์มีแนวโน้มให้ค่าที่ต่ำกว่าประมาณ 2 อันดับขนาด ทั้งนี้มีข้อสังเกต ถ้าหากควบคุมการจ่ายศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (E_{corr}) ไม่อยู่ในช่วง 10 – 30 mV จะมีผลต่อกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (i_{corr}) ที่อ่านค่าได้ทำให้เกิดการผิดพลาดในการคำนวณค่า (R_p) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าเกิดการผิดพลาดทำให้ค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมตรงจุดนั้นคลาดเคลื่อนและการประเมินตรวจสอบโครงสร้างจะไม่มีที่น่าเชื่อถือ



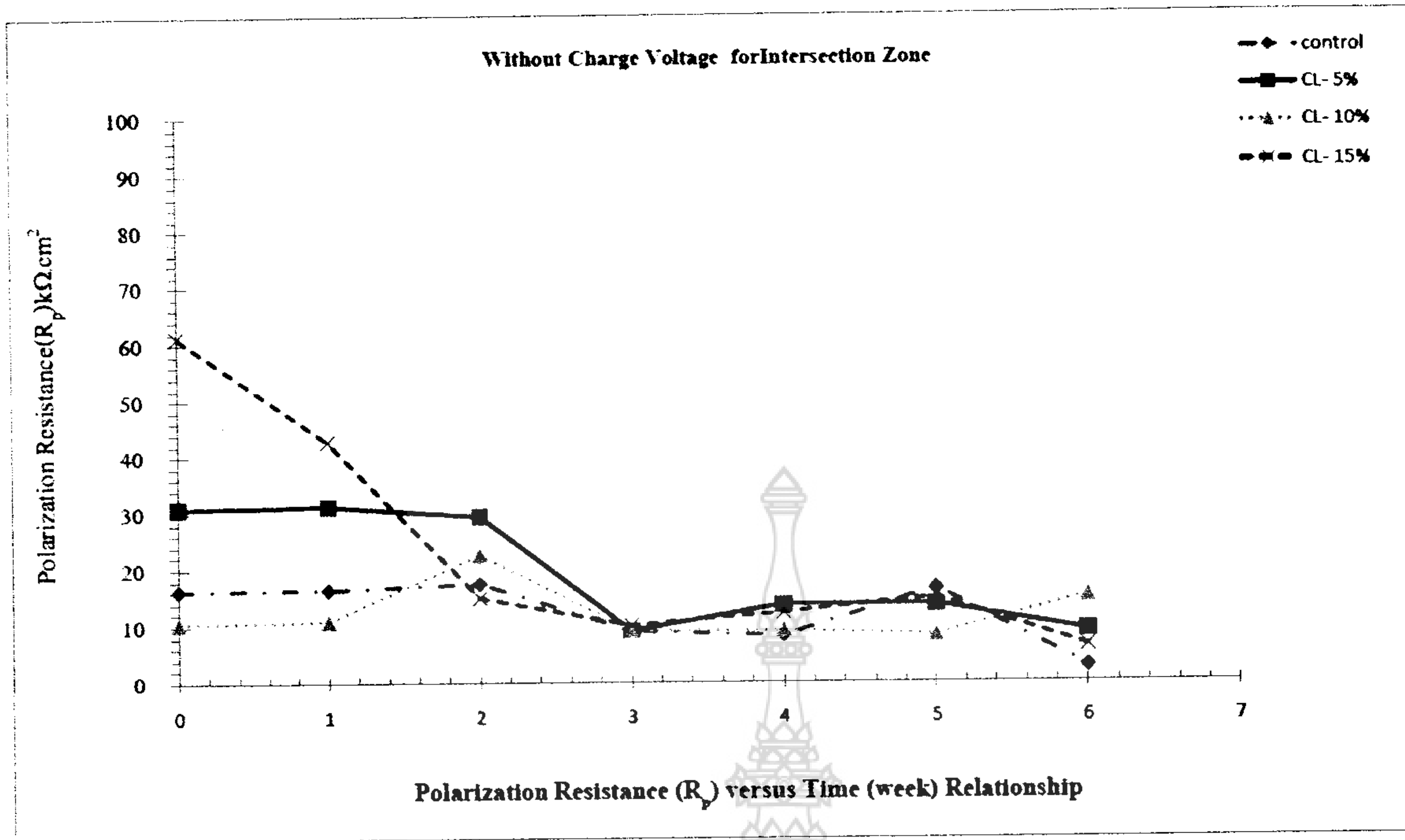
ตารางที่ 6-6 ค่าความต้านทานโพลาไรซ์เชิงเส้น (R_p) ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพ
สิ่งแวดล้อมทะเล

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม								
เวลา (สัปดาห์)	ค่า R_p บริเวณจุดมุมของเหล็กเสริม ($K.\Omega.cm^2$)				ค่าของ R_p บริเวณตรงกลางเหล็กเสริม ($K.\Omega.cm^2$)			
	Control	1% Cl ⁻	10% Cl ⁻	15% Cl ⁻	Control	5% Cl ⁻	10% Cl ⁻	15% Cl ⁻
0	16.3	30.09	10.55	61.3	7.35	7.65	3.2	6.05
1	16.56	31.35	10.91	42.80	7.50	7.75	3.38	6.16
2	17.6	29.48	22.59	15.05	7.41	7.20	2.67	5.89
3	9.14	9.20	9.30	10.16	6.43	6.5	2.43	5.88
4	8.28	13.80	9.20	12.31	6.23	5.02	3.02	5.83
5	6.56	13.80	8.35	15.05	6.67	5.09	2.50	5.75
6	2.76	9.11	15.16	6.41	6.37	4.28	1.69	4.88

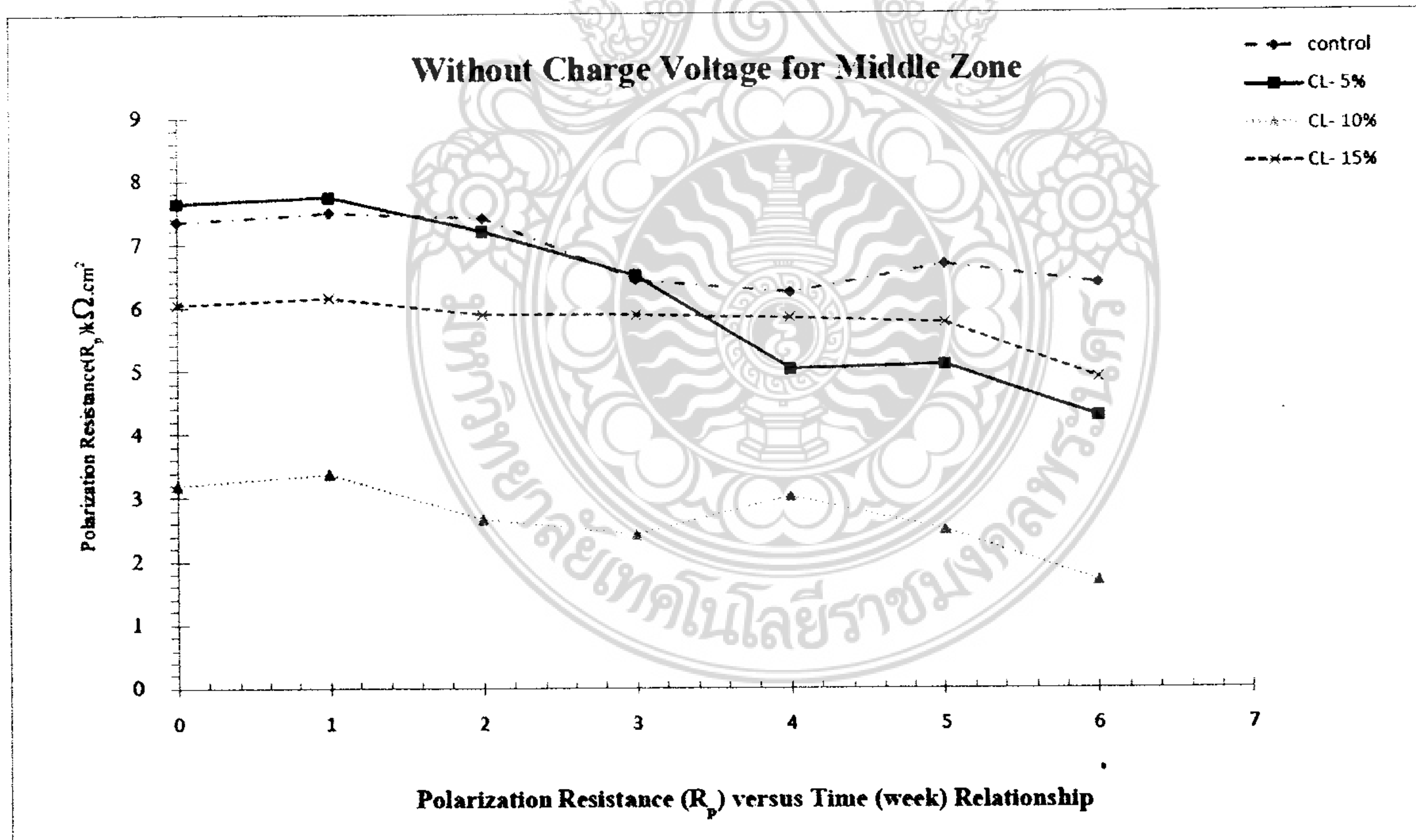
ตารางที่ 6-7 ค่าความต้านทานโพลาไรซ์เชิงเส้น (R_p) ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพ
สิ่งแวดล้อมทะเล

ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม								
เวลา (สัปดาห์)	ค่า R_p บริเวณจุดมุมของเหล็กเสริม ($K.\Omega.cm^2$)				ค่าของ R_p บริเวณตรงกลางเหล็กเสริม ($K.\Omega.cm^2$)			
	Control	5% Cl ⁻	10% Cl ⁻	15% Cl ⁻	Control	5% Cl ⁻	10% Cl ⁻	15% Cl ⁻
0	9.02	9.66	28.96	12.42	7.82	9.10	38.57	13.85
1	8.28	7.87	25.52	11.26	6.43	8.6	27.06	9.50
2	8.4	7.53	20.7	11.04	5.74	8.10	36.57	7.2
3	8.35	7.05	19.12	10.65	5.57	7.52	26.79	6.3
4	7.91	6.9	16.25	10.28	4.43	6.8	14.29	5.50
5	6.80	6.83	11.04	8.35	3.5	6.03	14.09	3.21
6	6.28	6.2	9.36	6.12	2.20	5.50	9.00	2.79



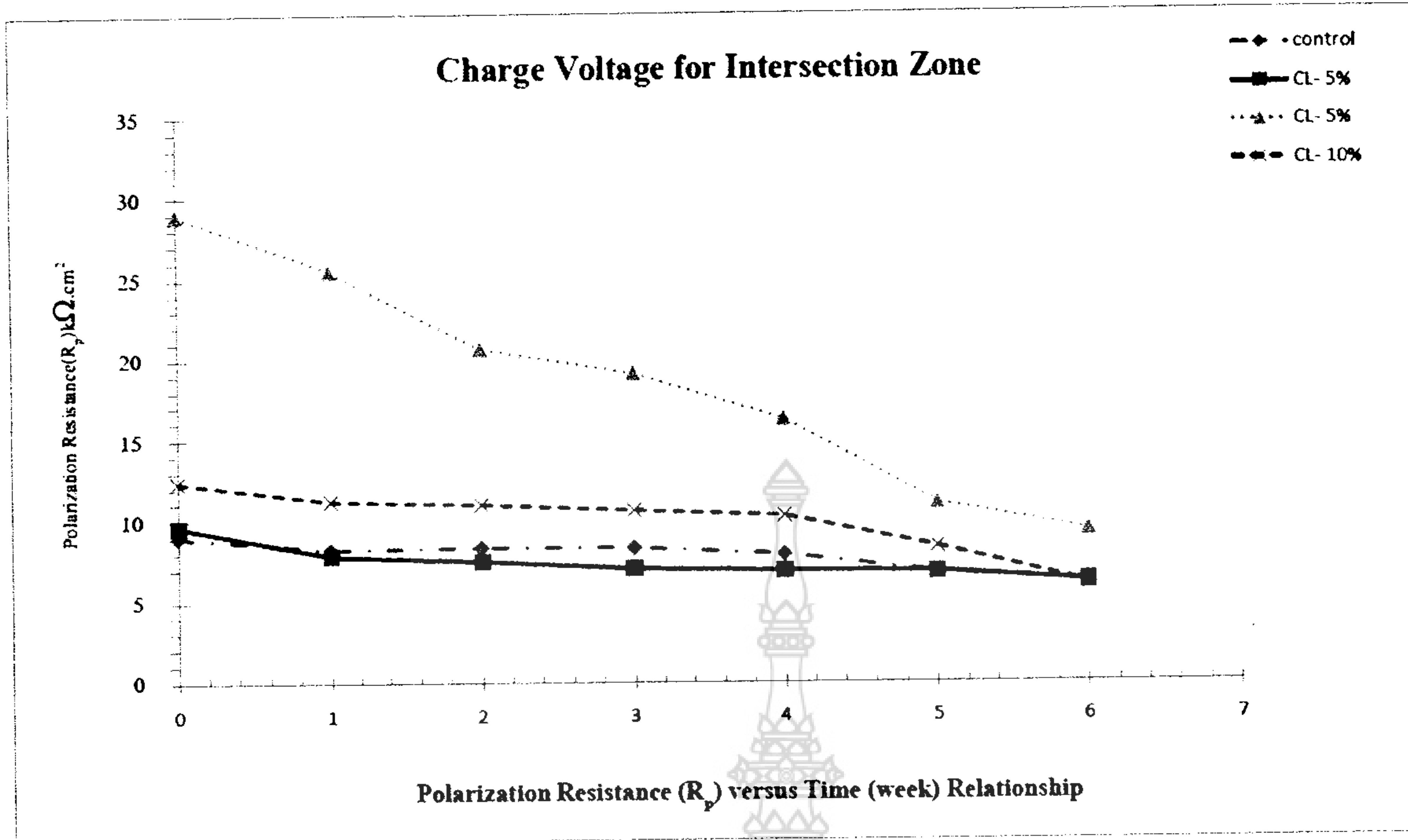


ภาพที่ 6-5 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไรซ์เชิงเส้นของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคานคอนกรีตไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมวัดค่าตรงตำแหน่งมุมของเหล็กเสริม โดยวิธีการ LPR

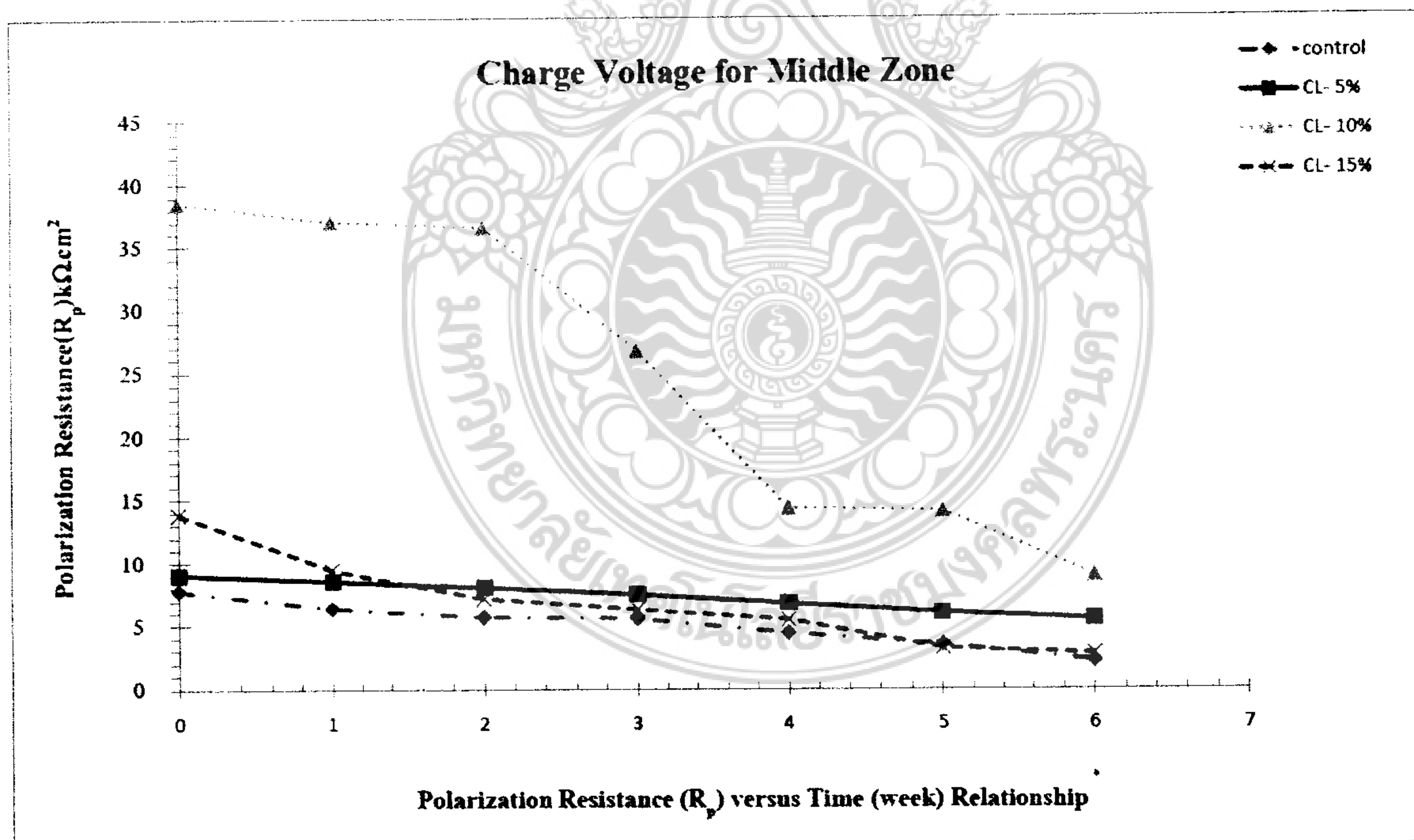


ภาพที่ 6-6 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไรซ์เชิงเส้นของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคานคอนกรีตที่ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมวัดค่าตำแหน่งตรงกลางของเหล็กเสริม โดยวิธีการของ LPR





ภาพที่ 6-7 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไรซ์เชิงเส้นของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมวัดค่าบริเวณตำแหน่งจุดมุมของเหล็กเสริม โดยวิธีการของ LPR



ภาพที่ 6-8 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไรซ์เชิงเส้นของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมวัดค่าบริเวณตำแหน่งจุดตัดกันของเหล็กเสริม โดยวิธีการของ LPR



1. ค่าอัตราการเกิดสนิม (i_{corr}) ของเหล็กเสริม

เมื่ออัตราการเกิดสนิมแสดงอยู่ในรูปความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าซึ่งการเกิดสนิมซึ่งแปรผันโดยตรงกับความต้านทานโพลาไรซ์ขั้น (R_p) (ASTM G59) แสดงไว้ดังสมการ

$$I_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p} \quad (6-1)$$

และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (i_{corr}) หาได้จากค่าของเหล็กเสริมตรงบริเวณที่วัดค่าซึ่งคำนวณได้ตามสมการ

$$i_{\text{corr}} = \frac{I_{\text{corr}}}{A} \quad (6-2)$$

จากผลการทดสอบค่าอัตราการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์โดยนำค่าที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับค่าอัตราการเกิดสนิมตามตารางที่ 6-8 โดยมีเงื่อนไขขอบเขตการวิจัยของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กถูกจำลองให้อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเลได้ถูกกำหนดให้มีส่วนผสมของปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 0% 5% 3% และ 15% ของน้ำหนักซีเมนต์ตามลำดับ ตัวอย่างแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบ่งออกเป็น 2 ชุดคือ ชุดแรกกำหนดให้เร่งการเกิดสนิมด้วยวิธีการใช้กระแสไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 8 โวลต์และชุดที่สองกำหนดให้ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าสำหรับวิธีการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากำหนดให้วัดค่าบริเวณจุดตัดของเหล็กเสริมและบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริมซึ่งเป็นเหล็กเสริมท่อนเดียวกัน

ตารางที่ 6-8 กระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม เปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

อัตราการเกิดสนิม (I_{corr})	เงื่อนไขสถานะของเหล็กเสริม
$I_{\text{corr}} < 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	สถานะยังไม่เกิดสนิม
$I_{\text{corr}} 0.1-0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	อัตราการเกิดสนิมต่ำถึงปานกลาง
$I_{\text{corr}} 0.5-1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	อัตราการเกิดสนิมปานกลางถึงสูง
$I_{\text{corr}} > 1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	อัตราการเกิดสนิมสูง

ที่มา : (C.Andrade, M.C.Alonso. et al,1990)

จากผลการทดสอบที่คำนวณหาค่าอัตราการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้เงื่อนไขตัวอย่างอยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล โดยการแปรผันส่วนผสมของปริมาณคลอไรด์ของตัวอย่างสรุปได้ตามตารางที่ 6-8 ถึง 6-12



ตารางที่ 6-9 ค่าอัตราการเกิดสนิม (i_{corr}) ของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม								
เวลา (สัปดาห์)	ค่า i_{corr} บริเวณจุดมุมของเหล็กเสริม ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)				ค่าของ i_{corr} บริเวณตรงกลางเหล็กเสริม ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			
	Control	5% Cl ⁻	3% Cl ⁻	15% Cl ⁻	Control	5% Cl ⁻	3% Cl ⁻	15% Cl ⁻
0	1.46	0.81	2.22	0.28	3.33	3.27	7.5	4.22
1	1.57	0.83	2.38	0.31	3.47	3.35	7.70	4.22
2	1.35	0.88	2.65	1.73	3.89	3.61	7.87	4.41
3	1.46	1.83	2.83	2.56	4.04	5.78	10.69	4.33
4	1.14	1.88	2.83	2.85	4.89	6.33	10.73	3.32
5	1.57	1.88	2.51	2.73	5.90	6.36	11.78	6.93
6	2.42	2.85	3.58	4.06	6.55	7.26	11.32	7.64

ตารางที่ 6-10 ค่าอัตราการเกิดสนิม (i_{corr}) ของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล

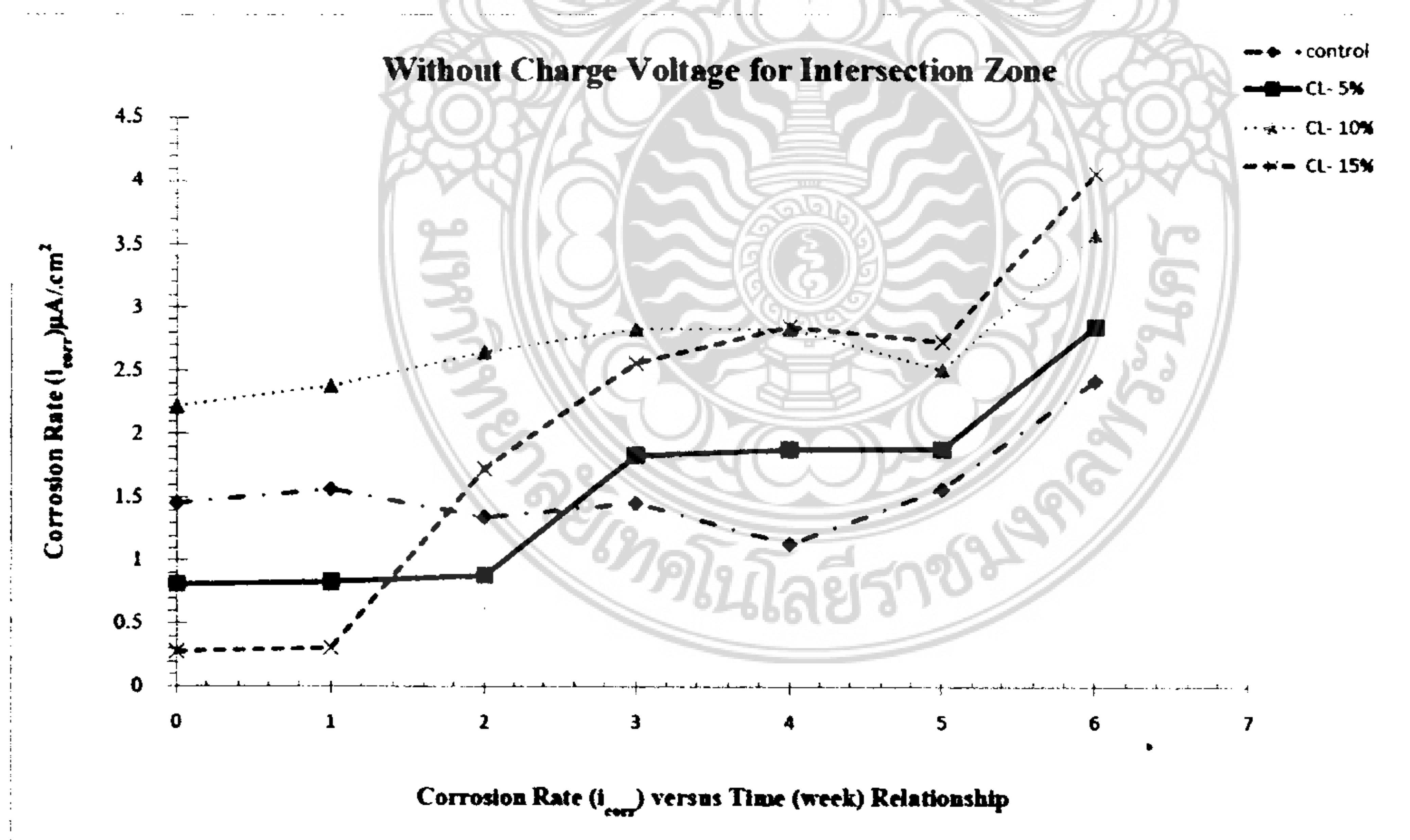
ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม								
เวลา (สัปดาห์)	ค่า i_{corr} บริเวณจุดมุมของเหล็กเสริม ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)				ค่าของ i_{corr} บริเวณตรงกลางเหล็กเสริม ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			
	Control	5% Cl ⁻	10% Cl ⁻	15% Cl ⁻	Control	5% Cl ⁻	10% Cl ⁻	15% Cl ⁻
0	1.32	1.69	2.67	1.69	2.39	1.21	1.67	1.88
1	2.14	2.31	2.71	1.71	3.04	2.22	1.85	2.78
2	2.03	3.25	3.25	2.36	53.49	3.21	2.67	3.33
3	2.90	3.73	3.79	2.77	4.03	6.79	3.83	3.08
4	3.40	3.67	4.16	3.14	4.69	6.67	3.07	4.47
5	3.31	4.20	5.25	3.11	4.43	7.80	3.02	4.09
6	4.14	4.47	5.53	3.79	5.84	8.83	4.89	6.89

จากผลการทดสอบวัดค่าจากตัวอย่างแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 24 ตัวอย่างที่สภาวะแตกต่างกันและคำนวณได้ค่าอัตราการการเกิดสนิมของเหล็กเสริมพบว่าค่าอัตราการเกิดสนิมมีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าของความต้านทานโพลาไรซ์ขั้นและจากความสัมพันธ์ระหว่างสภาพสิ่งแวดล้อมของตัวอย่างที่มีความแตกต่างกันพบว่าตัวอย่างคอนกรีตควบคุมให้ค่าอัตราการเกิดสนิมต่ำที่สุดมีค่าทุก



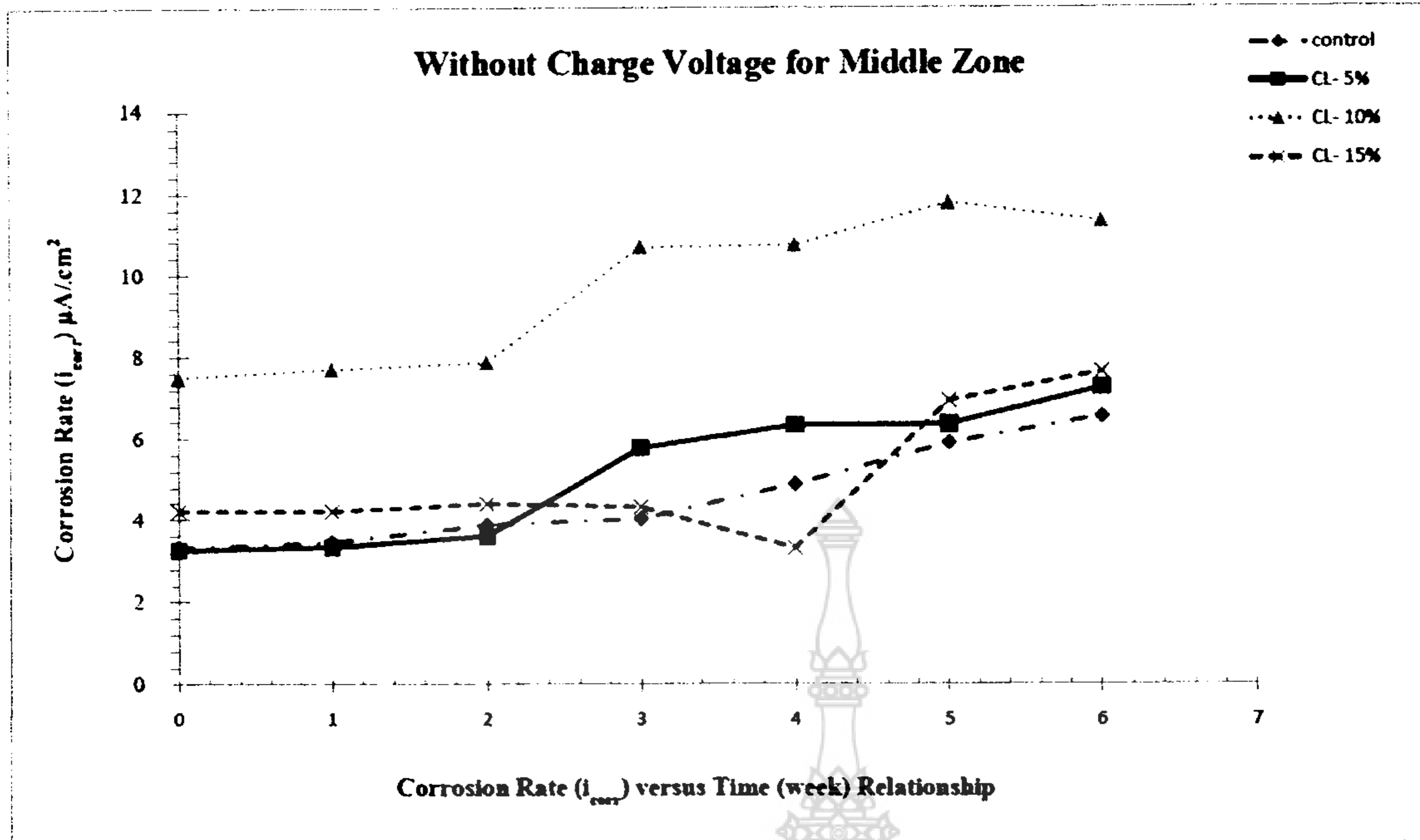
ระยะเวลาที่มีค่าอยู่ในช่วง $0.5-1.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($i_{\text{corr}} > 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) เปรียบเทียบกับข้อมูลในตารางที่ 14.1 แสดงให้เห็นว่า เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมที่ระดับน้อยจนถึงระดับปานกลาง โดยที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมที่ระยะเวลา 1 สัปดาห์แต่ไม่ได้แปรผันไปตามระยะเวลา เมื่อพิจารณาค่าอัตราการเกิดสนิมพบว่าตัวอย่างแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คลอไรด์ผสมอยู่มากให้ผลของแนวโน้มการเกิดสนิมมากกว่าทุกกรณี ในขณะที่ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมจะให้ค่าอัตราการเกิดสนิมที่มากกว่าอยู่ในช่วง $1-6 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($i_{\text{corr}} > 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) แสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมสูงมาก

อย่างไรก็ตามค่าอัตราการเกิดสนิมที่คำนวณได้มีค่าไม่สม่ำเสมอเนื่องจากปัจจัยที่หลากหลาย ดังเช่น สภาพแวดล้อมในขณะทดสอบจะมีผลต่อการบันทึกค่าเช่น ปริมาณความชื้นในคอนกรีต อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน และเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าเช่น เครื่องที่ใช้วัดค่าต้องมีความละเอียดสูงมากในระดับนาโน เพราะค่าความต้านทานของคอนกรีตและเหล็กเสริมมีค่าต่ำมากการวัดค่าแต่ละครั้งต้องวัดทีเดียวทั้งระบบซึ่งมีความยุ่งยากซับซ้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ที่ใช้เป็นสื่อ Probe เพื่อส่งสัญญาณผ่านคอนกรีต ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าการไหลของกระแสไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าไปยังคานผิวเหล็กเสริมซึ่งเป็นการส่งสัญญาณในลักษณะที่ไม่มีการจำกัดขอบเขตของกระแสไฟฟ้าให้อยู่ภายใต้ขั้วไฟฟ้าส่งผลให้กระแสไฟฟ้าแพร่กระจายเกินออกไปทางด้านข้างซึ่งเป็นเรื่องที่ไม่ทราบ โดยเฉพาะเหล็กเสริมที่มีคานที่ขนาดกว้างมาก (S. Feliu, J.A. Gonzalez, C. Andrade., et al., 1988) เป็นเหตุให้ได้ผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้องเพราะว่าพื้นผิวของเหล็กเสริมบริเวณที่โพล่าไรต์ (Polarized) ไม่ถูกต้องซึ่งทำให้การคำนวณค่าความหนาแน่นเกิดการผิดพลาด

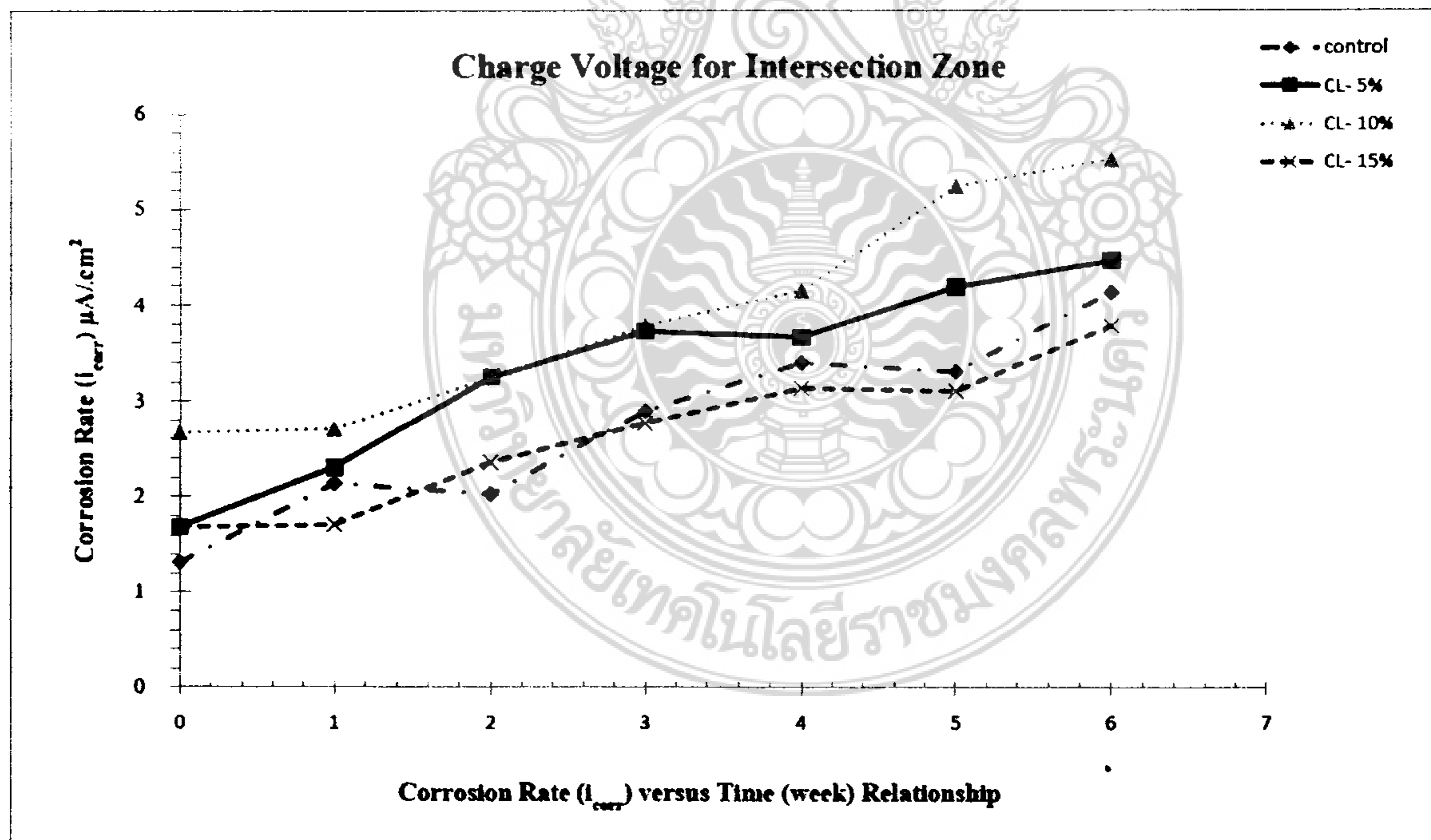


ภาพที่ 6-9 ความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคานคอนกรีตที่ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมวัดค่าบริเวณตำแหน่งจุดมุมของเหล็กเสริม โดยวิธีการของ LPR



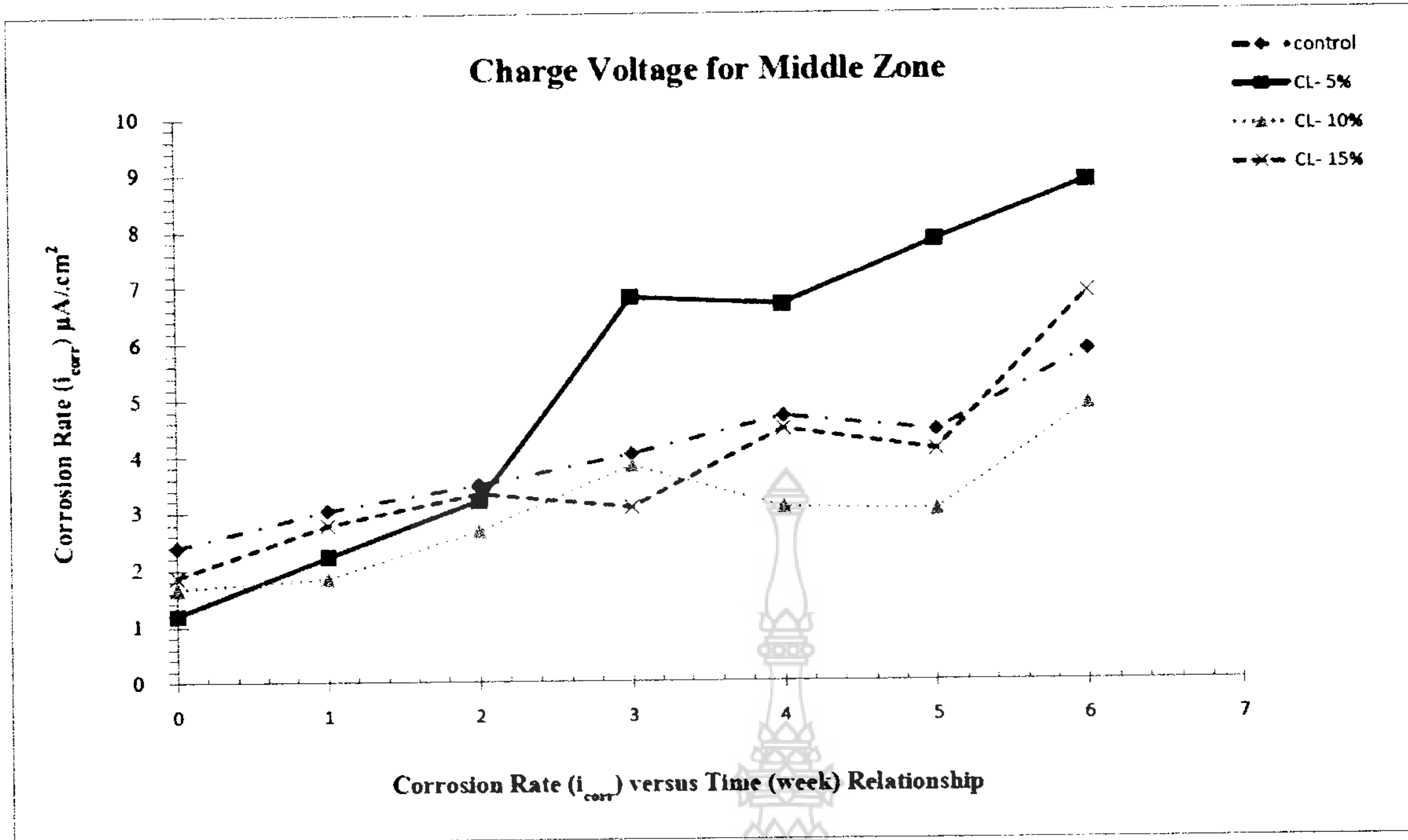


ภาพที่ 6-10 ความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคานคอนกรีตที่ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมวัดค่าบริเวณตำแหน่งตรงกลางของเหล็กเสริม โดยวิธีการของ LPR



ภาพที่ 6-11 ความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมวัดค่าบริเวณตำแหน่งจุดมุมของเหล็กเสริม โดยวิธีการของ LPR





ภาพที่ 6-12 ความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคานคอนกรีตที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมวัดค่าบริเวณตำแหน่งตรงกลางของเหล็กเสริมโดยวิธีการของ LPR

6.3 บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดสอบและศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในแผ่นคานคอนกรีตที่อยู่ในสภาพการจำลองสิ่งแวดล้อมทะเลโดยการวิจัยในครั้งนี้ได้พัฒนาสร้างเครื่องมือและอุปกรณ์ในการตรวจสอบและวัดค่าคือ Half-Cell Potential สำหรับการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กเสริม และเครื่องมือ 3LP device ใช้วิธีการของ LPR ที่ได้สร้างขึ้นเพื่อหาค่าความต้านทานโพลาไรซ์ขั้น (R_p) และค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริม (i_{corr}) สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตตัวอย่างที่มีเปอร์เซ็นต์ของคลอไรด์มากกว่าจะมีโอกาสเกิดที่เหล็กเสริมเกิดสนิมมากกว่าโครงสร้างคอนกรีตที่มีคลอไรด์ปนเปื้อนอยู่น้อยกว่า เมื่อพิจารณาด้วยเงื่อนไขที่เร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้าก็จะทำให้ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าติดลบสูงมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่ได้มีการเร่งด้วยกระแสไฟฟ้า อย่างไรก็ตามค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสามารถบอกความเป็นไปได้ของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมแต่ไม่ได้บอกสถานะในปัจจุบันว่ามีสนิมมากน้อยเพียงใดค่าที่วัดได้เป็นค่าที่สรุปในลักษณะแนวโน้มของการเกิดสนิม ซึ่งอาจเป็นค่าของการเกิดสนิมที่ไม่แท้จริงเนื่องจากอาจมีผลกระทบต่อบังคับที่หลากหลาย เช่น สภาพความชื้นของคอนกรีตในขณะการทดสอบ ต้องควบคุมอย่างประณีตให้มีความสม่ำเสมอ และผิวของโครงสร้างคอนกรีตและความหนาของ

คอนกรีตที่มีความต้านทานสูงจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวคอนกรีตต่ำซึ่งมีผลทำให้การประเมินแนวโน้มของการเกิดสนิมมีความผิดพลาด หลังจากได้ทำการสร้างเครื่องมือวัดค่าโพลาไลต์แล้วพบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับการวัดแบบครึ่งเซลล์มาตรฐาน ผลที่ได้เป็นไปในทางเดียวกัน และสามารถวัดค่าอัตราการกัดกร่อนสอดคล้องกันตามผลการทดลองโดยเมื่อนำค่าที่ค่าความต้านทานโพลาไลต์เซชันที่วัดจากแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กมาพิจารณาค่าความต้านทานโพลาไลต์ของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่าค่าของความต้านทานโพลาไลต์ที่มีค่าสอดคล้องกับระยะเวลาและอัตราการเกิดสนิมเหล็กตามสถานะจำลอง

6.4 ข้อเสนอแนะ

6.4.1 การวัดค่าโพลาไลต์เซชันยังอยู่ในสถานะการจำลองการกัดกร่อน และ โปรแกรมที่สร้างขึ้นยังต้องมีการปรับแก้ให้ผู้ใช้เกิดความสะดวกมากขึ้น

6.4.2 ในการใช้Probe วัดแบบโดยตรงกับคอนกรีตนั้นยังมีความผิดพลาดเนื่องจากสถานะแวดล้อมอื่น ดังนั้นจึงควรมีการพัฒนาตัวตรวจจับในลักษณะอื่นๆต่อไป



บรรณานุกรม

1. วัชรการ วงศ์กำจันทร์ วันชัย ขอดสุคใจ และสุวิมล ลัจจวาณิชย์. ศูนย์วัสดุและโครงสร้าง ภาค
2. วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ “โยธาสาร วิศวกรรมสารแห่ง ประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์” ปีที่ 22 ฉบับที่ 4 กค.-สก. 2553
3. Andrade, C. and J.A. Gaonzalez. "Quantitative Measurements of Corrosion Rates of Reinforcing Steels
4. Andrade, C., V. Castelo, C. Alonso, and Y. Gonzalez. ASTM STP 906. Philadelphia, PA: ASTM, 1984, pp. 43-63.
5. Borgard, B., C. Warren, S. Somayaji, and R. Heidersbach. Corrosion Rates of Steel in Concrete. ASTM STP 1065.
6. Broomfield, J. P. "The Determination of Rates of Highway Bridge Deterioration. Rehabilitation and Life Cycle Costing Under the Strategic Highway Research Program."
7. Babskow, A. "Some Achievements in the Field of Logging and Processing the Focused Resistivity Logs." *Revue Roumaine de Geologie Geophysique et Geographie* 25 (1981): 115.
8. Berke, N.S., D.F. Shen, and K.M. Sundberg. Corrosion Rates of Steel in Concrete. ASTM STP 1065. Edited by N.S. Berke, V. Chaker, and D. Whiting. Philadelphia, PA: ASTM, 1990, pp. 38
9. C.Andrade, M.C.Alonso, J.A.Gonzalez, An initial effort to use corrosion rate measurements for estimating rebar durability corrosion rates of steel in concrete, *ASTM STP 1065*, N.S.Berke et al. editors. ASTM, Philadelphia 1990. 29-37.
10. Cady, P.D. Chloride Corrosion of Steel in Concrete. ASTM STP 629. Edited by D.E. Toltni and S.W. Dean, Jr., Philadelphia, PA: ASTM, 1977, pp. 3-11.
11. De Witte, L., K.P. Fournier, and H. Tejada-Flores. "Potential Distribution Due to a Cylindrical Electrode Mounted on an Insulating Probe." *Geophysics* XXII No. 1 (1957): 67.
12. Danson, J.L., D.G. John, M.I. Jafar, K. Hladky, and L. Sherwood. "Electrochemical Methods for the Inspection and Monitoring of Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete." In *Corrosion of Reinforcement in Concrete*, edited by C.L. Page et al. London: Elsevier, 1990, pp. 358-371.
13. Escalante, E., E. Whitton, and F. Qui. NBS Report NBSIR 86-3456. Washington, D.C.: NBS, October 1986, pp. 1-27.
14. Escalante, E. "Effectiveness of Potential Measurements for Estimating Corrosion of Steel in Concrete." In *Corrosion of Reinforcement in Concrete*, edited by C.L. Page et al. London: Elsevier, 1990, pp.281-292.



15. Embedded in Concrete Using Polarization Resistance Measurements." *Weri_toffe and Korrosion* 29 (1978): 515.
16. Elsener, B., S. Muller, M. Suter, and H. Bohni. *Measurement and Testing in Civil Engineering*, RILEM, Lyon, France (1988).
17. Feliu, S., J.A. Gonzalez, S. Feliu, Jr., and M. C. Andrade. "Polarization Resistance in Reinforced Concrete." *ACI Materials Journal* No. 87-M47 (Sept./Oct. 1990): 457-460.
18. Feliu, S., J.A. Gonzalez, M.L. Escudero, and C. Andrade. Influence of Counter Electrode size on the on-site Measurement of
19. Feliu, S., J.A. Gonzalez, M.L. Eseudero, S. Feliu, Jr., and C. Andrade. _Possibilities of the Guard Ring for Electrical Signal Confinement in the Polarization Measurements of Reinforcements. _ *Corrosion* 46 No. 12 (1990): 1015.
20. F. Mansfeld. In: *Polarization Resistance Measurement, Electrochemical Techniques for*
21. *Corrosion*, National Association of Corrosion Engineers, Houston (1977), p. 18–26.
22. Guyod, H. "Factors Affecting the Responses of Laterolog-Type Logging Systems (LI3 and LL7)." *Journal of Petroleum Technology* 16 (1964): 211.
23. Guoyd, H. "Examples of Current Distribution About Laterolog Sondes." *The Log Analyst* 7 No. 1 (1966): 27
24. Holm, J. *Corrosion, Concrete and Chlorides*. American Concrete Institute SP 102. Edited by F.W. Gibson. Detroit, MI: ACI, 1987, p. 35.
25. Jasinski, R.J., and K.D. Efird. "Eleetroehemical Corrosion Measurements in Crude Oil." *Corrosion* 43 No. 8 (1987): 476.
26. Jasinski, R.L, and K.D. Efird. "Electroehemical Corrosion Probe for High Resistivity
27. *Hydrocarbon/Water Mixtures*. _ *Corrosion* 44 No. 9 (1988): 658.
28. K.C.Clear, "Time to corrosion of reinforcing steel in concrete slabs", Report No. FHWA/RD-
29. 82/028, *Federal Highway Administration, Washington, D.C.*, 1982.
30. Litvan, G. and J. Bickley. *Concrete Durability*. Detroit, MI: American Concrete Institute SP 100. Edited by J. ScaIon. 1987, pp. 1503-1515.
31. Matsuoka, K., H. Kihira, S. Ito, and T. Murata. *Corrosion Rates of Steel in Concrete*. ASTM STP 1065. Edited by N.S. Berke, V. Chaker, and D. Whiting. Philadelphia, PA: ASTM, 1990,pp.103- 117.
32. Moran, J.H., and R.E. Chemali. "More on the Laterlog Device.* *Geophysical Prospecting* 27 (1979): 902.



33. M. Stern and A.L. Geary, *J. Electrochem. Soc.* 104 (1) (1957) 56.
34. M.G. Grantham and J. Broomfield, *Construction and Materials* 11 (1997) 215
35. Millard, S.G., M.H. Ghassemi, J.H. Bnngy, and M.I. Jafar. "Assessing the Electrical Resistivity of Concrete Structures for Corrosion Durability Studies." In *Corrosion*
36. Sagues, A.A. *Critical Issues in Electrochemical Corrosion Measurements Techniques.*
37. SchieB1, P. "Chlorindinduzierte Korrosion von Stab1 in Beton." *Betonwerk und Fertigteil Technik* 10 (1986): 626.
38. Slater, J. *Corrosion of Metals in Association with Concrete.* ASTM STP 818. Philadelphia, PA: ASTM, 1983, 83 pp.
39. Sehgal, A., Y.T. Kho, K. Osseo-Asare, and H.W. Picketing. Paper 39.1. Presented at the 29th Annual Conference of Canadian Institute of Metallurgists, Hamilton, Canada, 1990.
40. S. Feliu, J.A. Gonzalez, C. Andrade and V. Feliu. *Corrosion* 44 (1988) 761
41. S. Feliu, J.A. Gonzalez and C. Andrade. *ACI Special Publication* SP151-10 (1994) 183
42. S. Feliu, J.A. Gonzalez, S. Feliu, Jr and C. Andrade. *ACI Mat J* 87 (1990) 457
43. S. Feliu, J.A. Gonzalez and C. Andrade. *J Appl Electrochem* 26 (1996) 305
44. Tamura, M., M. Nagayama, and K. Shimozawa. *Corrosion of Reinforcement in Concrete.* Edited by C.L. Page, K.W. Treadway, and K.P.B. Bamforth. New York: Elsevier Applied Science, 1990, p. 372.
45. Tamura, H. and M. Yoshida. Detroit, MI: American Concrete Institute. SP-82. 1984, pp. 689-702.
66. Simon, P. Paper No. 380. Presented at Corrosion '89. New Orleans, April 1989.
46. Wenger, F., and J. Galland. "Analysis of Local Corrosion of Large Metallic Structures or Reinforced Concrete Structures by Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)." *Electrochimica Acta* 35 No. 10 (1990):1573.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคานคอนกรีต



ภาคผนวก ก

ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสปีทิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสปีทิมของแผ่นคานคอนกรีต

ตารางภาคผนวกที่ ก1 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสปีทิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสปีทิมของแผ่นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสปีทิมของเหล็กเสริมที่อายุ 0 สัปดาห์										
จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A
Control	-403.9	252.30	-402.3	254.10	-401.6	254.80	-400.3	256.20	-398.6	257.70
5% Cl ⁻	-467.3	326.40	-466.4	325.80	-465.7	326.00	-464.5	326.50	-463.3	327.50
10% Cl ⁻	-515.8	404.40	-514.5	406.60	-514.0	407.00	-513.2	408.30	-512.3	409.60
15% Cl ⁻	-511.2	355.40	-506.3	354.90	-501.2	351.80	-499.1	352.10	-496.7	352.80
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสปีทิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสปีทิม (μ V)				
Control	-403.9	-402.3	-401.6	-400.3	-398.6	252.30	254.10	254.80	256.20	257.70
5% Cl ⁻	-467.3	-466.4	-465.7	464.5	-463.3	326.40	325.80	326.00	326.50	327.50
10% Cl ⁻	-515.8	-514.5	-514.0	-513.2	-512.3	404.40	406.60	407.00	408.30	409.60
15% Cl ⁻	-511.2	-506.3	-501.2	-499.1	-496.7	350.10	350.50	351.80	352.10	352.80



ตารางภาคผนวกที่ ก2 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสปีทและกระแสไฟฟ้าการเกิดสปีทของแผ่นคาน
คอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสปีทของเหล็กเสริมที่อายุ 0 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A
Control	-394.4	253.70	-392.6	256.00	-391.8	256.80	-390.8	258.14	-389.6	259.60
5% Cl ⁻	-459.5	315.70	-458.8	317.40	-458.0	318.00	-456.9	319.20	-455.6	320.70
10% Cl ⁻	-549.8	402.00	-549.1	403.60	-548.9	404.50	-548.4	405.40	-548.0	406.90
15% Cl ⁻	-540.9	380.10	-540.4	382.90	-539.6	383.20	-538.5	384.10	-537.2	385.10
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสปีท (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสปีท (μ V)				
Control	-394.4	-392.6	-391.8	-390.8	-389.6	253.70	256.00	256.80	258.14	259.60
5% Cl ⁻	-459.5	-458.8	-458.0	-456.9	-455.6	315.70	317.40	318.00	319.20	320.70
10% Cl ⁻	-549.8	-549.3	-548.9	-548.4	-548.0	402.00	403.6	404.50	405.40	406.90
15% Cl ⁻	-540.9	-540.4	-539.6	-538.5	-537.2	380.10	382.90	383.20	384.10	385.10

ตารางภาคผนวกที่ ก3 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสปีทและกระแสไฟฟ้าการเกิดสปีทของแผ่นคาน
คอนกรีตเสริมเหล็กกรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสปีทของเหล็กเสริมที่อายุ 1 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A	mV	μ A
Control	-316.8	213.00	-313.8	213.40	-312.4	213.30	-310.3	213.80	-307.5	213.60
5% Cl ⁻	-447.3	306.30	-447.0	304.80	-446.1	304.40	-445.0	305.20	-443.8	306.00
10% Cl ⁻	-424.7	280.70	-422.8	282.90	-421.9	283.40	-420.7	284.50	-419.3	285.90
15% Cl ⁻	-538.1	355.60	-537.6	354.80	-537.1	355.10	-536.3	356.40	-535.3	357.50
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสปีท (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสปีท (μ V)				
Control	-315.0	-312.0	-311.2	-310.3	-310.0	212.50	213.15	213.30	213.80	213.60
5% Cl ⁻	-447.3	-447.0	-446.1	-445.0	-443.8	304.10	304.80	304.40	305.20	306.00
10% Cl ⁻	-424.7	-422.8	-421.9	-420.7	-419.3	280.70	282.90	283.40	284.50	285.90
15% Cl ⁻	-538.1	-537.6	-537.1	-536.3	-535.3	355.60	354.80	355.10	356.40	357.50



ตารางภาคผนวกที่ ก4 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคาน
คอนกรีตเสริมเหล็กกรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุ 1 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-333.4	216.90	-327.8	211.30	-325.7	210.70	-322.1	209.70	-319.4	209.80
5% Cl ⁻	-448.1	305.80	-446.8	307.80	-446.0	308.40	-444.9	309.80	-443.8	311.30
10% Cl ⁻	-445.6	287.80	-443.0	290.20	-441.5	290.90	-439.8	292.10	-438.0	293.60
15% Cl ⁻	-543.3	380.00	-541.0	383.40	-539.8	384.50	-539.2	385.90	-538.6	387.60
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (μV)				
Control	-333.4	-327.8	-325.7	-322.1	-321.0	209.80	209.90	210.70	211.00	216.00
5% Cl ⁻	-448.1	-446.8	-446.0	-444.9	-443.8	305.80	307.80	308.40	309.80	311.30
10% Cl ⁻	-445.6	-443.0	-441.5	-439.8	-438.0	287.80	290.20	290.90	292.10	293.60
15% Cl ⁻	-543.3	-541.0	-539.8	-539.2	-538.6	380.00	383.40	384.50	385.90	387.60

ตารางภาคผนวกที่ ก5 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคาน
คอนกรีตเสริมเหล็กกรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุ 2 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-376.6	294.90	-374.4	295.00	-373.3	295.50	-371.4	295.60	-369.8	296.50
5% Cl ⁻	-363.6	235.00	-361.4	237.40	-360.9	238.20	-360.5	239.40	-359.0	240.60
10% Cl ⁻	-403.0	294.50	-401.0	296.70	-400.0	297.60	-398.9	299.10	-397.7	300.60
15% Cl ⁻	-460.1	446.60	-458.8	449.00	-458.6	449.60	-457.4	451.10	-456.5	453.10
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (μV)				
Control	-376.6	-374.4	-373.3	-371.4	-369.8	294.50	295.00	295.50	295.80	296.50
5% Cl ⁻	-363.6	-361.4	-360.9	-360.5	-359.0	235.00	237.40	238.20	239.40	240.60
10% Cl ⁻	-403.0	-401.0	-400.0	-398.9	-397.7	294.50	296.70	297.60	299.10	300.60
15% Cl ⁻	-460.1	-458.8	-458.6	-457.4	-456.5	446.60	449.00	449.60	451.10	453.10



ตารางภาคผนวกที่ 6 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสปีดและกระแสไฟฟ้าการเกิดสปีดของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสปีดของเหล็กเสริมที่อายุ 2 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-427.0	320.60	-426.0	322.30	-425.5	323.50	-424.7	324.20	-423.9	325.00
5% Cl ⁻	-358.2	216.80	-355.5	223.70	-353.6	226.60	-351.5	230.40	-349.6	234.20
10% Cl ⁻	-414.0	274.70	-413.8	278.30	-413.5	279.10	-413.2	281.90	-411.0	285.20
15% Cl ⁻	-506.3	502.00	-504.2	504.30	-502.7	505.00	-501.1	506.30	-498.2	506.50
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสปีด (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสปีด (μV)				
Control	-427.0	-426.0	-425.5	-424.7	-423.9	320.60	322.30	323.50	324.20	325.00
5% Cl ⁻	-358.2	-355.5	-353.6	-351.5	-349.6	216.80	223.70	226.60	230.40	234.20
10% Cl ⁻	-414.0	-413.8	-413.5	-413.2	-411.0	274.70	278.30	279.10	281.90	285.20
15% Cl ⁻	-506.3	-504.2	-502.7	-501.1	-498.2	502.00	504.30	505.00	506.30	506.50

ตารางภาคผนวกที่ 7 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสปีดและกระแสไฟฟ้าการเกิดสปีดของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กกรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสปีดของเหล็กเสริมที่อายุ 3 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-455.0	248.00	-444.0	250.00	-433.0	251.00	-442.0	252.00	-441.0	253.00
5% Cl ⁻	-404.0	212.00	-403.0	214.00	-402.0	215.00	-401.0	216.00	-400.0	218.00
10% Cl ⁻	-430.0	210.00	-429.0	211.00	-429.0	212.00	-428.0	213.00	-427.0	214.00
15% Cl ⁻	-455.0	234.00	-455.0	236.00	-454.0	237.00	-454.0	238.00	-454.0	240.00
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสปีด (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสปีด (μV)				
Control	-455.0	-444.0	-433.0	-442.0	-441.0	248.00	250.00	251.00	252.00	253.00
5% Cl ⁻	-404.0	-403.0	-402.0	-401.0	-400.0	212.00	214.00	215.00	216.00	218.00
10% Cl ⁻	-430.0	-429.0	-429.0	-428.0	-427.0	210.00	211.00	212.00	213.00	214.00
15% Cl ⁻	-455.0	-455.0	-454.0	-454.0	-454.0	234.00	236.00	237.00	238.00	240.00



ตารางภาคผนวกที่ ก8 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสปีดและกระแสไฟฟ้าการเกิดสปีดของแผ่นคาน
คอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสปีดของเหล็กเสริมที่อายุ 3 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-463.0	249.00	-462.0	251.00	-461.0	252.00	-460.0	252.00	-459.0	253.00
5% Cl ⁻	-402.0	213.00	-401.0	214.00	-400.0	215.00	-400.0	216.00	-399.0	217.00
10% Cl ⁻	-433.0	221.00	-431.0	223.00	-430.0	222.00	-429.0	223.00	-428.0	224.00
15% Cl ⁻	-487.0	248.00	-477.0	250.00	-476.0	251.00	-476.0	252.00	-475.0	254.00
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสปีด (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสปีด (μV)				
Control	-463.0	-462.0	-461.0	-460.0	-459.0	249.00	251.00	252.00	252.00	253.00
5% Cl ⁻	-402.0	-401.0	-400.0	-400.0	-399.0	213.00	214.00	215.00	216.00	217.00
10% Cl ⁻	-433.0	-431.0	-430.0	-429.0	-428.0	221.00	223.00	222.00	223.00	224.00
15% Cl ⁻	-487.0	-477.0	-476.0	-476.0	-475.0	248.00	250.00	251.00	252.00	254.00

ตารางภาคผนวกที่ ก9 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสปีดและกระแสไฟฟ้าการเกิดสปีดของแผ่นคาน
คอนกรีตเสริมเหล็กกรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสปีดของเหล็กเสริมที่อายุ 4 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-298.0	315.00	-291.0	317.00	-281.0	318.00	-277.0	319.00	-276.0	320.00
5% Cl ⁻	-336.0	260.00	-334.0	262.70	-333.0	263.20	-332.0	264.30	-331.0	265.60
10% Cl ⁻	-432.0	306.50	-430.0	309.00	-430.0	309.50	-429.0	311.00	-428.0	312.70
15% Cl ⁻	-520.0	394.40	-519.0	396.60	-518.0	397.20	-516.0	398.50	-515.0	400.00
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสปีด (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสปีด (μV)				
Control	-298.0	-291.0	-281.0	-277.0	-276.0	315.00	317.00	318.00	319.00	320.00
5% Cl ⁻	-336.0	-334.0	-333.0	-332.0	-331.0	260.00	262.70	263.20	264.30	265.60
10% Cl ⁻	-432.0	-430.0	-430.0	-429.0	-428.0	306.50	309.00	309.50	311.00	312.70
15% Cl ⁻	-520.0	-519.0	-518.0	-516.0	-515.0	394.40	396.60	397.20	398.50	400.00



ตารางภาคผนวกที่ ก10 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสปีทิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสปีทิมของแผ่นคาน
คอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสปีทิมของเหล็กเสริมที่อายุ 4 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-413.0	336.00	-412.0	338.00	-411.0	338.60	-410.0	340.00	-410.0	341.00
5% Cl ⁻	-330.0	244.00	-329.0	246.00	-328.0	246.70	-327.0	248.00	-328.0	249.40
10% Cl ⁻	-458.0	320.40	-458.0	321.00	-457.0	322.00	-456.0	323.60	-456.0	325.00
15% Cl ⁻	-528.0	379.00	-528.0	381.60	527.00	382.60	-526.0	384.00	-526.0	385.00
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสปีทิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสปีทิม (μV)				
Control	-413.0	-412.0	-411.0	-410.0	-409.5	336.00	338.00	338.60	340.00	341.00
5% Cl ⁻	-330.0	-329.0	-328.0	-327.0	-328.0	244.00	246.00	246.70	248.00	249.40
10% Cl ⁻	-458.0	-458.0	-457.0	-456.0	-456.0	320.40	321.00	322.00	323.60	325.00
15% Cl ⁻	-528.0	-528.0	-527.0	-526.0	-526.0	379.00	381.60	382.60	384.00	385.00

ตารางภาคผนวกที่ ก11 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสปีทิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสปีทิมของแผ่นคาน
คอนกรีตเสริมเหล็กกรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสปีทิมของเหล็กเสริมที่อายุ 5 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-231.2	231.20	-231.1	231.40	-231.0	231.60	-231.0	232.40	-231.0	232.80
5% Cl ⁻	-190.4	190.40	-190.3	190.80	-190.2	190.90	-190.1	191.00	-190.0	191.20
10% Cl ⁻	-261.0	261.30	-260.5	261.90	-260.4	261.30	-260.3	261.40	-260.0	261.60
15% Cl ⁻	-185.0	184.10	-184.5	184.60	-184.3	185.00	-184.2	185.70	-184.0	186.30
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสปีทิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสปีทิม (μV)				
Control	-231.2	-231.1	-231.0	-231.0	-231.0	231.20	231.40	231.60	232.40	232.80
5% Cl ⁻	-190.4	-190.3	-190.2	-190.1	-190.0	190.40	190.80	190.90	191.00	191.20
10% Cl ⁻	-261.0	-260.5	-260.4	-260.3	-260.0	261.30	261.50	261.55	261.59	261.60
15% Cl ⁻	-185.0	-184.5	-184.3	-184.2	-184.0	184.10	184.60	185.00	185.70	186.30



ตารางภาคผนวกที่ ก12 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสปีดและกระแสไฟฟ้าการเกิดสปีดของแผ่นคาน
คอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม

ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสปีดของเหล็กเสริมที่อายุ 5 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-222.5	222.80	-222.4	222.90	-222.3	223.00	-222.2	223.50	-222.0	223.80
5% Cl ⁻	-190.5	190.70	-190.3	191.00	-190.2	191.40	-190.1	191.60	-190.0	191.80
10% Cl ⁻	-230.0	230.10	-229.6	230.00	-229.4	230.00	-229.3	230.00	-229.0	230.00
15% Cl ⁻	-204.0	204.20	-203.6	204.40	-203.4	204.70	-203.2	205.00	-202.0	205.50
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสปีด (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสปีด (μV)				
Control	-222.5	-222.4	-222.3	-222.2	-222.0	222.80	222.90	223.00	223.50	223.80
5% Cl ⁻	-190.5	-190.3	-190.2	-190.1	-190.0	190.70	191.00	191.40	191.60	191.80
10% Cl ⁻	-230.0	-229.6	-229.4	-229.3	-229.0	230.10	230.20	230.40	230.45	230.50
15% Cl ⁻	-204.0	-203.6	-203.4	-203.2	-202.0	204.20	204.40	204.70	205.00	205.50

ตารางภาคผนวกที่ ก13 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสปีดและกระแสไฟฟ้าการเกิดสปีดของแผ่นคาน
คอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม

ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสปีดของเหล็กเสริมที่อายุ 6 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-617.7	308.60	-614.5	310.30	-613.0	312.09	-611.5	319.60	-611.0	320.00
5% Cl ⁻	-372.0	229.20	-371.8	230.10	-371.0	232.60	-369.9	234.60	-368.5	236.60
10% Cl ⁻	-305.0	169.50	-304.0	169.60	-298.0	169.70	-288.0	169.80	-284.0	169.90
15% Cl ⁻	-436.7	238.40	-436.6	241.50	-435.2	243.00	-433.5	244.80	-431.5	246.80
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสปีด (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสปีด (μV)				
Control	-617.7	-614.5	-613.0	-611.5	-611.0	308.60	310.30	312.09	319.60	320.00
5% Cl ⁻	-372.0	-371.8	-371.0	-369.9	-368.5	229.20	230.10	232.60	234.60	236.60
10% Cl ⁻	-306.0	-305.0	-303.5	-302.8	-303.0	168.50	169.10	169.50	169.55	169.90
15% Cl ⁻	-436.7	-436.6	-435.2	-433.5	-431.5	238.40	241.50	243.00	244.80	246.80



ตารางภาคผนวกที่ ก14 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสปีดและกระแสไฟฟ้าการเกิดสปีดของแผ่นคาน
คอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม

ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสปีดของเหล็กเสริมที่อายุ 6 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-586.0	279.00	-584.0	281.00	-583.0	282.50	-582.5	282.90	-582.2	286.20
5% Cl ⁻	-408.0	230.00	-405.0	237.80	-401.3	241.30	-396.1	245.30	-392.4	248.30
10% Cl ⁻	-290.1	171.50	-286.1	170.90	-284.2	174.20	-279.6	171.80	-277.8	173.40
15% Cl ⁻	-434.1	257.90	-432.9	259.60	-431.6	261.20	-430.4	263.06	-429.1	265.00
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสปีด (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสปีด (μV)				
Control	-586.0	-584.0	-583.0	-582.5	-582.2	279.00	281.00	282.50	282.90	286.20
5% Cl ⁻	-408.0	-405.0	-401.3	-396.1	-392.4	230.00	237.80	241.30	245.30	248.30
10% Cl ⁻	-290.1	-286.1	-284.2	-279.6	-277.8	171.50	172.00	173.00	173.80	174.00
15% Cl ⁻	-434.1	-432.9	-431.6	-430.4	-429.1	257.90	259.60	261.20	263.06	265.00

ตารางภาคผนวกที่ ก15 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสปีดและกระแสไฟฟ้าการเกิดสปีดของแผ่นคาน
คอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม

ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสปีดของเหล็กเสริมที่อายุ 1 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-655.4	458.00	-654.9	461.60	-654.4	461.80	-653.4	462.70	-652.3	463.50
5% Cl ⁻	-295.0	214.00	-293.7	216.60	-293.4	217.30	-292.9	218.60	-292.1	220.20
10% Cl ⁻	-462.0	298.00	-464.4	304.70	-468.0	310.00	-467.5	311.60	-468.9	315.30
15% Cl ⁻	-634.0	465.00	-633.6	467.20	-632.9	467.60	-631.8	468.70	-630.8	469.90
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสปีด (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสปีด (μV)				
Control	-655.4	-654.9	-654.4	-653.4	-652.3	458.00	461.60	461.80	462.70	463.50
5% Cl ⁻	-295.0	-293.7	-293.4	-292.9	-292.1	214.00	216.60	217.30	218.60	220.20
10% Cl ⁻	-468.9	-467.0	-467.5	-465.0	-462.0	298.00	304.70	310.00	311.60	315.30
15% Cl ⁻	-634.0	-633.6	-632.9	-631.8	-630.8	465.00	467.20	467.60	468.70	469.90



ตารางภาคผนวกที่ ก16 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคาน

คอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม

ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุ 1 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-639.0	444.50	-637.7	445.10	-637.2	445.40	-636.2	446.40	-634.8	447.23
5% Cl ⁻	-344.8	240.10	-344.1	240.30	-344.3	240.70	-343.8	242.04	-343.3	243.60
10% Cl ⁻	-660.0	648.00	-659.6	649.10	-658.4	649.07	-657.2	650.01	-655.9	650.80
15% Cl ⁻	-625.5	449.30	-624.7	450.91	-624.3	451.60	-623.6	453.10	-622.8	454.70
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (μV)				
Control	-639.0	-637.7	-637.2	-636.2	-634.8	444.50	445.10	445.40	446.40	447.23
5% Cl ⁻	-344.8	-344.5	-344.3	-343.8	-343.3	240.10	240.30	240.70	242.04	243.60
10% Cl ⁻	-660.0	-659.6	-658.4	-657.2	-655.9	648.00	649.10	649.25	650.01	650.80
15% Cl ⁻	-625.5	-624.7	-624.3	-623.6	-622.8	449.30	450.91	451.60	453.10	454.70

ตารางภาคผนวกที่ ก17 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคาน

คอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม

ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุ 2 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-648.0	506.30	-648.4	502.00	-646.7	499.50	-645.3	499.00	-645.0	498.80
5% Cl ⁻	-356.0	220.00	-355.5	223.10	-354.0	224.50	-353.5	225.90	-352.0	227.50
10% Cl ⁻	-623.9	585.70	-622.2	588.20	-621.3	588.80	-618.0	589.00	-617.4	591.00
15% Cl ⁻	-340.6	235.60	-323.3	231.60	-328.2	229.40	-323.7	228.00	-318.8	226.30
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (μV)				
Control	-648.0	-648.4	-646.7	-645.3	-645.0	506.60	507.20	507.50	507.80	507.90
5% Cl ⁻	-356.0	-355.5	-354.0	-353.5	-352.0	220.00	223.10	224.50	225.90	227.50
10% Cl ⁻	-623.9	-622.2	-621.3	-618.0	-617.4	585.70	588.20	588.80	589.00	591.00
15% Cl ⁻	-340.6	-332.3	-328.2	-323.7	-318.8	235.60	231.60	229.40	228.00	226.30



ตารางภาคผนวกที่ ก18 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคาน
เสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม

ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุ 2 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-562.0	409.80	-556.7	408.00	-555.4	407.80	-554.2	408.00	-553.6	408.70
5% Cl ⁻	-379.0	217.30	-379.7	219.50	-380.1	220.10	-380.4	221.80	-381.4	221.80
10% Cl ⁻	-648.5	547.00	-647.5	548.60	-647.2	548.60	-646.6	549.40	-645.9	550.20
15% Cl ⁻	-349.0	217.30	-333.2	214.00	-328.7	213.10	-323.2	212.50	-318.2	211.80
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (μV)				
Control	-562.0	-556.7	-555.4	-554.2	-553.6	409.80	408.00	407.80	408.00	408.70
5% Cl ⁻	-379.0	-379.7	-380.1	-380.4	-381.4	217.30	219.50	220.10	221.80	221.80
10% Cl ⁻	-648.5	-647.5	-647.2	-646.6	-645.9	547.00	548.60	548.60	549.40	550.20
15% Cl ⁻	-349.0	-333.2	-328.7	-323.2	-318.2	217.30	214.00	213.10	212.50	211.80

ตารางภาคผนวกที่ ก19 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคาน
คอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม

ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุ 3 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-636.0	480.20	-635.2	482.30	-634.9	482.70	-634.5	482.20	-633.2	485.30
5% Cl ⁻	-313.5	242.30	-312.0	243.10	-311.0	243.10	-310.5	243.30	-309.6	244.20
10% Cl ⁻	-609.0	458.40	-604.7	459.70	-603.2	459.80	-601.6	460.70	-600.0	462.00
15% Cl ⁻	-328.1	161.20	-326.3	162.30	-326.2	162.40	-325.3	162.70	-323.0	162.90
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (μV)				
Control	-636.0	-635.2	-634.9	-634.5	-633.2	480.20	482.30	482.70	483.20	485.30
5% Cl ⁻	-313.5	-312.0	-311.0	-310.5	-309.6	242.30	242.90	243.10	243.30	244.20
10% Cl ⁻	-609.0	-604.7	-603.2	-601.6	-600.0	458.40	459.50	459.80	460.70	462.00
15% Cl ⁻	-328.1	-326.3	-326.2	-325.3	-323.0	161.20	162.30	162.40	162.70	162.90



ตารางภาคผนวกที่ ก20 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสปีทิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสปีทิมของแผ่นคาน
คอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม

ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสปีทิมของเหล็กเสริมที่อายุ 3 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-586.1	446.90	-584.5	449.70	-577.0	454.30	-575.0	456.60	-574.1	458.60
5% Cl ⁻	-304.3	223.00	-301.4	224.40	-300.0	224.80	-299.0	225.60	-298.4	226.70
10% Cl ⁻	-584.8	428.60	-583.0	431.20	-582.0	432.10	-580.8	433.60	-579.8	435.30
15% Cl ⁻	-334.7	156.20	-331.2	156.70	-329.0	153.90	-326.3	153.40	-323.0	152.60
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสปีทิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสปีทิม (μV)				
Control	-586.1	-584.5	-577.0	-575.0	-574.1	446.90	449.70	454.30	456.60	458.60
5% Cl ⁻	-304.3	-301.4	-300.0	-299.0	-298.4	223.00	224.40	224.80	225.60	226.70
10% Cl ⁻	-584.8	-583.0	-582.0	-580.8	-579.8	428.60	431.20	432.10	433.60	435.30
15% Cl ⁻	-334.0	-331.2	-330.5	-330.2	-330.0	156.20	156.50	156.80	156.90	157.50

ตารางภาคผนวกที่ ก21 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสปีทิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสปีทิมของแผ่นคาน
คอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม

ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสปีทิมของเหล็กเสริมที่อายุ 4 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-662.0	370.00	-661.0	372.00	-661.0	373.00	-661.0	374.00	-660.0	375.00
5% Cl ⁻	-425.0	204.00	-423.0	207.00	-423.0	208.00	-422.0	209.00	-421.0	210.00
10% Cl ⁻	-558.0	287.00	-557.0	289.00	-556.0	290.00	-556.0	291.00	-555.0	292.00
15% Cl ⁻	-716.0	528.00	-715.0	530.00	-715.0	531.00	-714.0	532.00	-713.0	534.00
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสปีทิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสปีทิม (μV)				
Control	-662.0	-661.0	-661.0	-661.0	-660.0	370.00	372.00	373.00	374.00	375.00
5% Cl ⁻	-425.0	-423.0	-423.0	-422.0	-421.0	204.00	207.00	208.00	209.00	210.00
10% Cl ⁻	-558.0	-557.0	-556.0	-556.0	-555.0	287.00	289.00	290.00	291.00	292.00
15% Cl ⁻	-716.0	-715.0	-715.0	-714.0	-713.0	528.00	530.00	531.00	532.00	534.00



ตารางภาคผนวกที่ ก22 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคาน
คอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม

ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุ 4 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-671.0	364.00	-670.0	366.00	-670.0	367.00	-670.0	369.00	-669.0	370.00
5% Cl ⁻	-411.0	195.00	-410.0	197.00	-409.0	198.00	-409.0	200.00	-409.0	201.00
10% Cl ⁻	-597.0	311.00	-596.0	313.00	-595.0	314.00	-595.0	315.00	-594.0	316.00
15% Cl ⁻	-772.0	482.00	-770.0	483.00	-769.0	483.50	-767.0	482.00	-766.0	483.00
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (μV)				
Control	-671.0	-670.0	-670.0	-670.0	-669.0	364.00	366.00	367.00	369.00	370.00
5% Cl ⁻	-411.0	-410.0	-409.0	-409.0	-409.0	195.00	197.00	198.00	200.00	201.00
10% Cl ⁻	-597.0	-596.0	-595.0	-595.0	-594.0	311.00	313.00	314.00	315.00	316.00
15% Cl ⁻	-772.0	-770.0	-769.0	-767.0	-766.0	482.00	483.00	483.50	483.90	484.00

ตารางภาคผนวกที่ ก23 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคาน
คอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม

ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุ 5 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-658.0	590.00	-655.0	590.60	-653.0	590.70	-652.0	591.00	-650.0	592.00
5% Cl ⁻	-478.0	240.00	-476.0	242.00	-476.0	243.00	-475.0	244.00	-474.0	245.60
10% Cl ⁻	-574.0	460.30	-573.0	461.80	-572.0	463.10	-571.0	464.90	-570.0	467.00
15% Cl ⁻	-587.0	421.70	-586.0	424.00	-586.0	424.50	-585.0	425.50	-584.0	426.80
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (μV)				
Control	-658.0	-655.0	-653.0	-652.0	-650.0	590.00	590.60	590.70	591.00	592.00
5% Cl ⁻	-478.0	-476.0	-476.0	-475.0	-474.0	240.00	242.00	243.00	244.00	245.60
10% Cl ⁻	-574.5	-573.1	-572.5	-571.3	-570.0	460.30	461.80	463.10	464.90	467.00
15% Cl ⁻	-587.0	-586.0	-586.0	-585.0	-584.0	421.70	424.00	424.50	425.50	426.80



ตารางภาคผนวกที่ ก24 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคาน
คอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม

ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุ 5 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-658.5	549.00	-657.0	549.50	-656.0	549.90	-655.0	549.90	-654.0	550.00
5% Cl ⁻	-490.0	262.00	-489.6	264.00	-489.3	265.00	-489.1	266.00	-489.0	267.00
10% Cl ⁻	-646.0	375.00	-645.0	377.00	-645.0	377.50	-645.0	378.00	-644.0	378.50
15% Cl ⁻	-651.0	466.00	-651.0	468.00	-651.0	469.00	-650.0	470.00	-649.0	472.00
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (μV)				
Control	-658.5	-657.0	-656.0	-655.0	-654.0	549.00	549.50	549.90	549.90	550.00
5% Cl ⁻	-490.0	-489.6	-489.3	-489.1	-489.0	262.00	264.00	265.00	266.00	267.00
10% Cl ⁻	-646.0	-645.0	-645.0	-645.0	-644.0	375.00	377.00	377.50	378.00	378.50
15% Cl ⁻	-651.0	-651.0	-651.0	-650.0	-649.0	466.00	468.00	469.00	470.00	472.00

ตารางภาคผนวกที่ ก25 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคาน
คอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณมุมของเหล็กเสริม

ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุ 6 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-464.5	464.00	-464.4	464.45	-464.3	464.70	-464.2	464.80	-464.0	464.95
5% Cl ⁻	-225.5	225.40	-225.4	225.50	-225.3	225.60	-224.7	225.65	-224.5	225.70
10% Cl ⁻	-314.5	314.60	-314.4	314.80	-314.3	314.90	-314.2	315.30	-314.1	315.60
15% Cl ⁻	-381.6	381.40	-381.5	381.45	-381.4	381.50	-381.3	381.55	-381.2	381.60
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (μV)				
Control	-464.5	-464.4	-464.3	-464.2	-464.0	464.00	464.45	464.70	464.80	464.95
5% Cl ⁻	-225.5	-225.4	-225.3	-224.7	-224.5	225.40	225.50	225.60	225.65	225.70
10% Cl ⁻	-314.5	-314.4	-314.3	-314.2	-314.1	314.60	314.80	314.90	315.30	315.60
15% Cl ⁻	-381.6	-381.5	-381.4	-381.3	-381.2	381.40	381.45	381.50	381.55	381.60



ตารางภาคผนวกที่ ก26 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคาน
คอนกรีตเสริมเหล็ก กรณีวัดค่าตรงบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริม

ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่อายุ 6 สัปดาห์

จำนวนครั้ง เงื่อนไข	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA	mV	μA
Control	-452.0	452.20	-451.6	452.40	-451.3	452.50	-451.1	452.60	-451.0	452.70
5% Cl ⁻	-295.8	295.70	-295.6	295.80	-295.4	295.85	-295.1	295.90	-295.0	295.95
10% Cl ⁻	-316.0	315.50	-315.8	315.90	-315.4	316.00	-315.2	316.20	-315.0	316.60
15% Cl ⁻	-402.6	401.70	-402.4	402.70	-402.1	403.00	-402.0	403.10	-402.0	403.20
	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดสนิม (mV)					กระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (μV)				
Control	-452.0	-451.6	-451.3	-451.1	-451.0	452.20	452.40	452.50	452.60	452.70
5% Cl ⁻	-295.8	-295.6	-295.4	-295.1	-295.0	295.70	295.80	295.85	295.90	295.95
10% Cl ⁻	-316.0	-315.8	-315.4	-315.2	-315.0	315.50	315.90	316.00	316.20	316.60
15% Cl ⁻	-402.6	-402.4	-402.1	-402.0	-402.0	401.70	402.70	403.00	403.10	403.20



ภาคผนวก ข

คุณสมบัติและการตั้งค่าอุปกรณ์



ภาคผนวก ข

คุณสมบัติและการตั้งค่าอุปกรณ์

ข.1 การตั้งค่าการสื่อสารในส่วนของโปรแกรมเชื่อมต่อระหว่าง PLC กับจอสั่งการ

การตั้งค่าการสื่อสารระหว่าง Touch Screen (NS-Series) กับออมนอน PLC (Omron)

การตั้งค่าการสื่อสารในส่วนของพีแอลซี

ขั้นตอนในการตั้งค่าการสื่อสารของตัวพีแอลซีนั้นจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

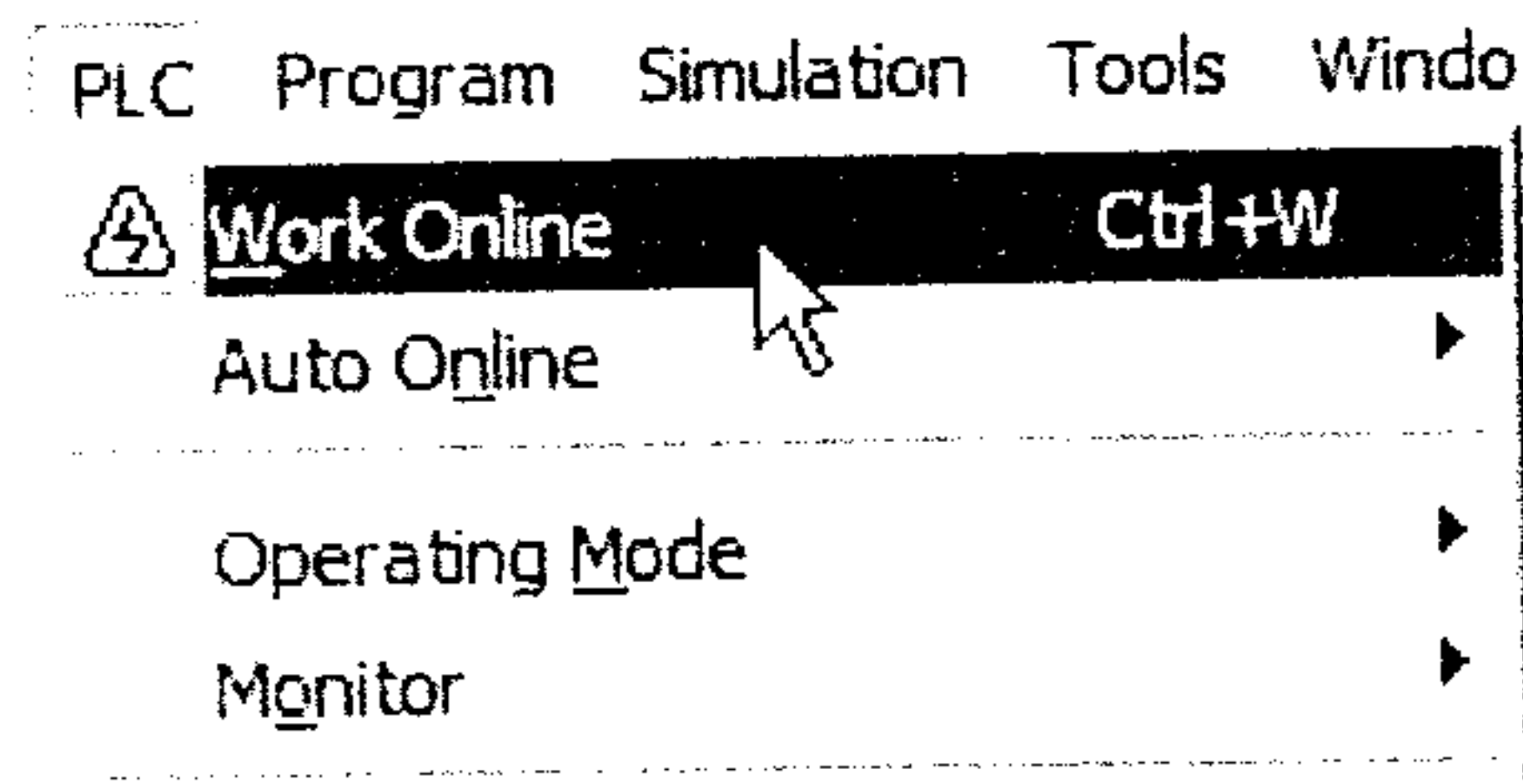
ทำการสร้าง New Project ขึ้นมาใหม่ โดยเข้าไปที่เมนู “File > New” จะปรากฏหน้าต่าง “Change PLC”

ขึ้นมามีดังรูปที่ 1

รูปที่ 1 หน้าต่าง Change PLC

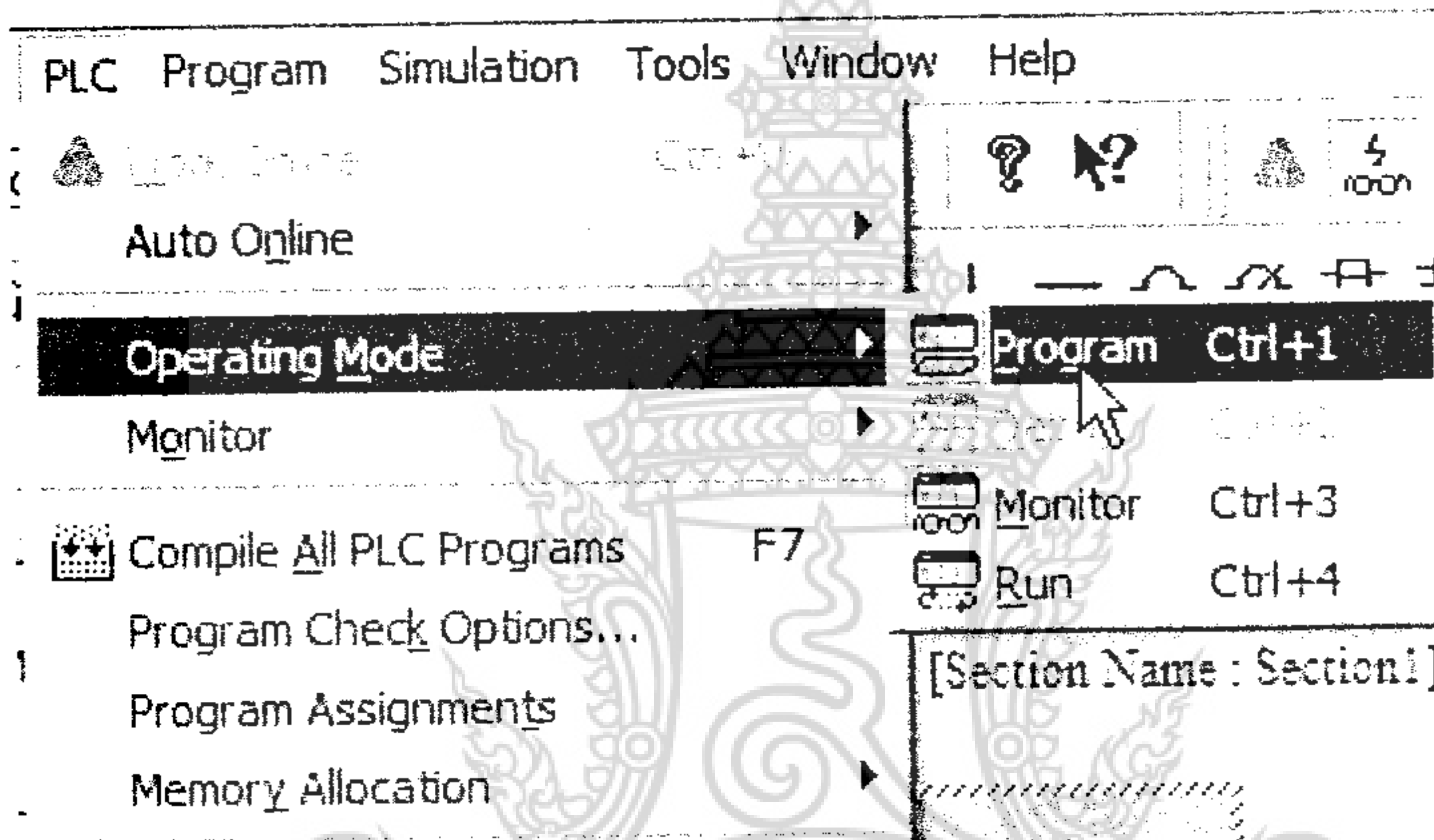
จากรูปที่ 1 ให้เลือกรุ่นของพีแอลซีในส่วนของ “Device Type” ให้ตรงกับพีแอลซีที่ทางผู้ใช้งานใช้จริง ในที่นี้ผู้เขียนจะเลือกเป็นรุ่น CQM1H-CPU21 ส่วนการตั้งค่า “Network Type” นั้นจะขึ้นอยู่กับ การเชื่อมต่อสายสัญญาณระหว่างตัวคอมพิวเตอร์กับพอร์ตสื่อสารของตัวพีแอลซี . โดยหากเชื่อมต่อสายสัญญาณเข้ากับ Port RS-232C (DB9 PIN) บนตัวของซีพียูให้เลือก “Network Type” เป็น “SYSMAC WAY” แต่หากเชื่อมต่อสายสัญญาณเข้ากับ “Peripheral Port” ให้เลือก “Network Type” เป็น “Tool Bus” เมื่อตั้งค่าเรียบร้อยแล้วก็ให้คลิกเลือก “OK”

หลังจากที่ได้โปรเจกใหม่มาแล้วให้ทำการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์เข้ากับตัวพีแอลซีโดยเข้าไปที่เมนูพีแอลซีแล้วเลือก “Work Online” ดังรูปที่ 2



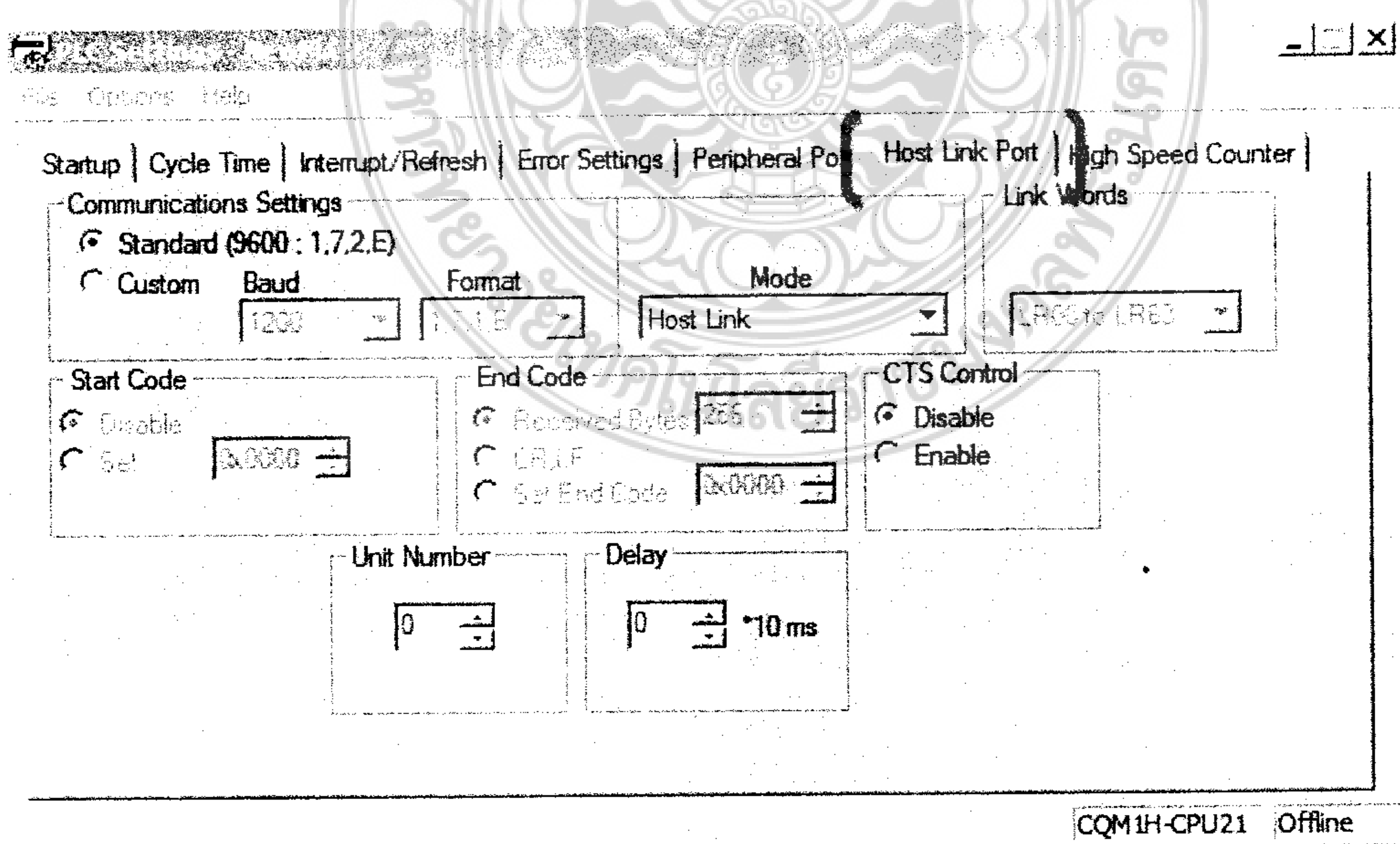
รูปที่ 2 การเชื่อมต่อ CX-Programmer เข้ากับตัวพีแอลซี (Work Online)

เมื่อได้ทำการเชื่อมต่อ “CX-Programmer” เข้ากับตัวพีแอลซีได้แล้วก็ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานของตัวพีแอลซีไปที่ “Program” โดยเลือกไปที่เมนู “PLC > Operation Mode > Program” ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การเปลี่ยนโหมดการทำงานของตัวพีแอลซี

จากนั้นเปิดหน้าต่าง “PLC Setting” โดยเข้าไปที่เมนู PLC > Edit > Setting จะปรากฏหน้าต่าง “PLC Setting” ขึ้นมา ในหน้าต่าง “PLC Setting” ให้คลิกเลือกที่แท็บ “Host Link Port” ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 หน้าต่าง PLC Setting สำหรับพีแอลซีรุ่น CQM1H-CPU21

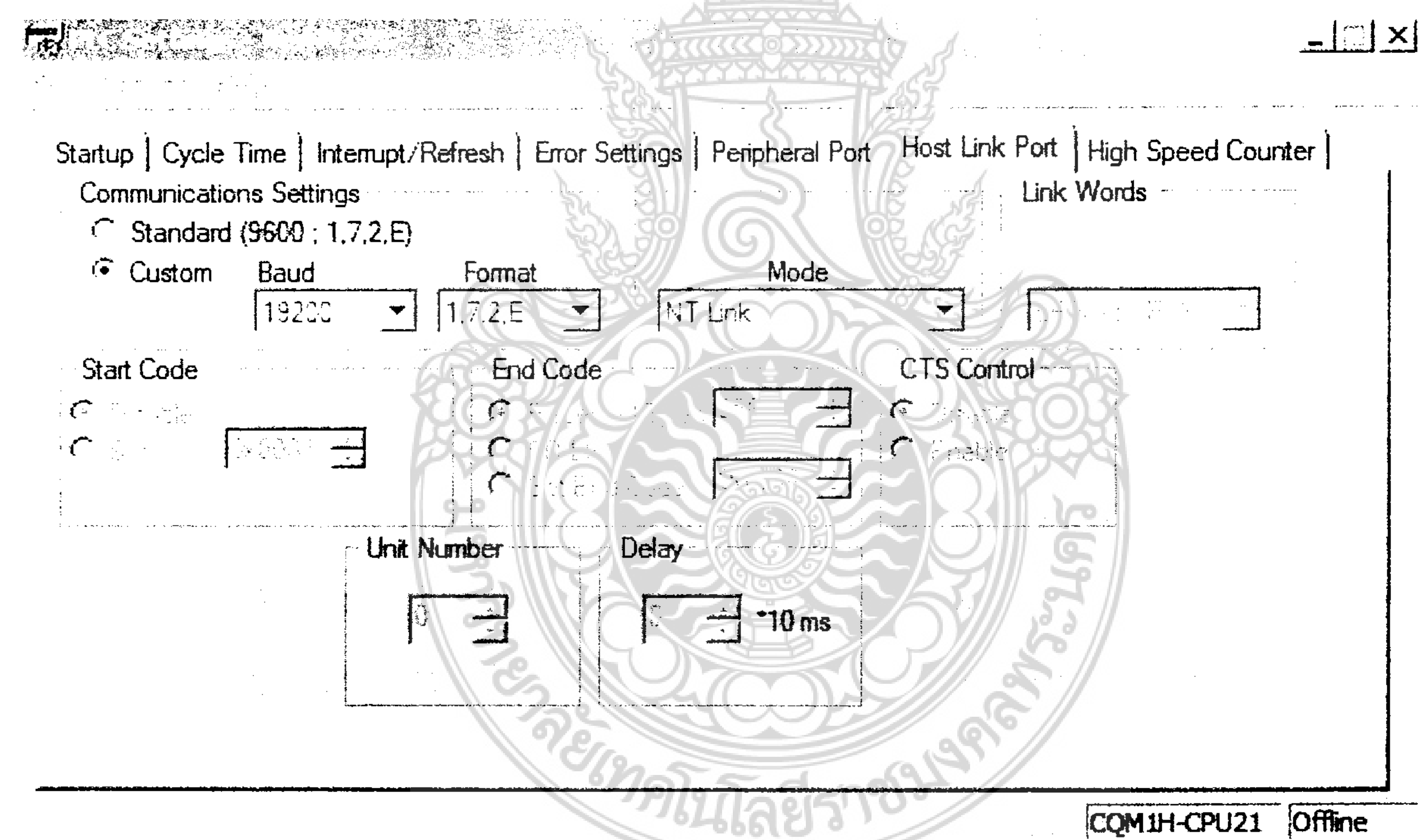
โดยโหมดการตั้งค่าการสื่อสารสำหรับ Touch Screen กับ PLC นั้นจะมีด้วยกันหลายโหมดดังนี้

- Host Link : เป็นโหมดการสื่อสารที่มีความเร็วให้เลือก 2 ความเร็วคือ 9600bps และ 19200 bps สามารถที่จะเชื่อมต่อ Touch Screen ได้แค่ 1 ตัวต่อ 1 PLC

- NT Link (หรือ NT Link 1:1) : โดยความเร็วในการรับส่งจะอยู่ที่ 115200 bps สามารถที่จะเชื่อมต่อ Touch Screen ได้แค่ 1 ตัวต่อ 1 PLC

- NT Link 1: N : เป็นโหมดการสื่อสารที่มีความเร็วให้เลือก 2 ความเร็วคือ 38400bps และ 11520 bps สามารถที่จะเชื่อมต่อ Touch Screen ได้ 8 ตัวต่อ 1 PLC

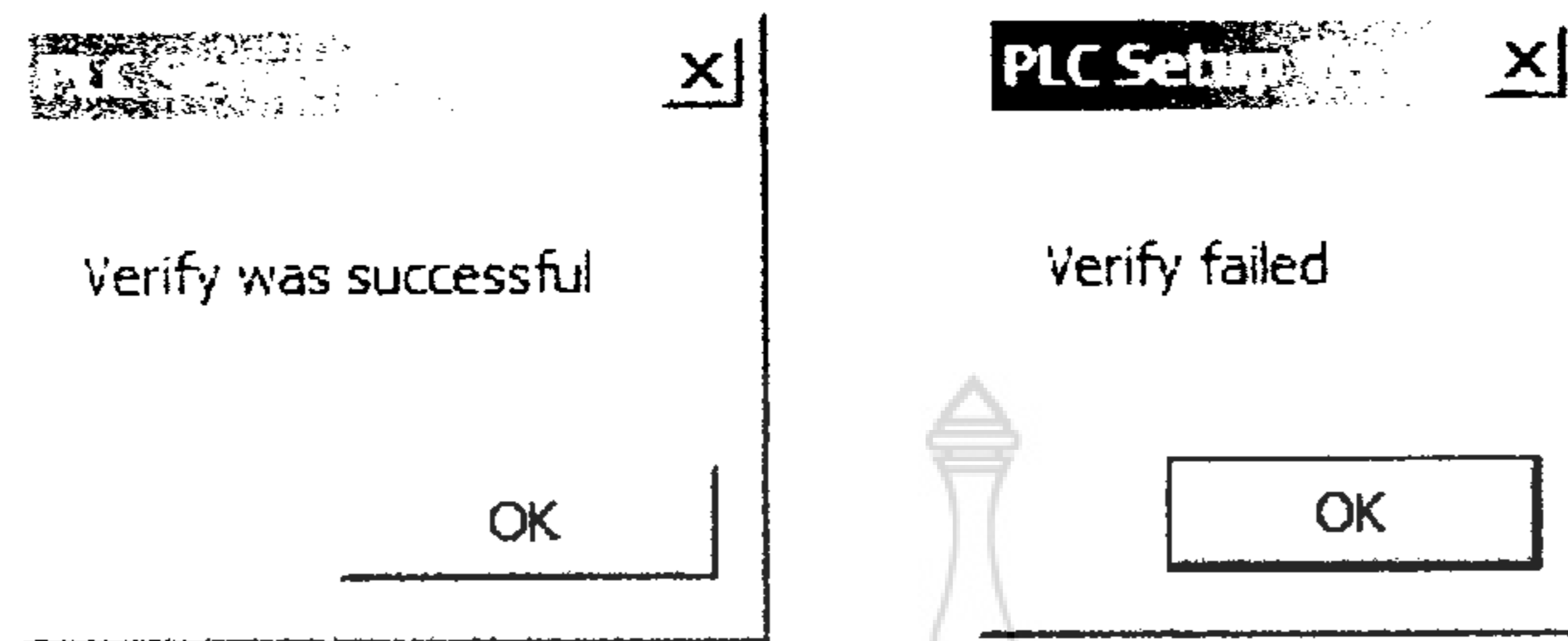
ซึ่งสำหรับ CQM1H จะมีให้เลือกแค่ Host Link กับ NT Link เท่านั้น แต่สำหรับพีแอลซีรุ่นใหม่เช่น CS1/CJ1 จะมีโหมดให้เลือกเป็น Host Link กับ NT Link 1: N สำหรับผู้เขียนเองจะเลือกโหมดเป็น Host Link เนื่องจากผู้เขียนเลือกรุ่นพีแอลซีเป็น CQM1H ส่วน “Communication Setting” ทางผู้เขียนจะเลือก Baud Rate เป็น 19200 และในส่วนของ Format ต้องเลือกเป็น 1, 7, 2, E เท่านั้น (เนื่องจากที่ตัวของ Touch Screen ถูกตั้งค่าตายตัวไว้แล้วที่ 1, 7, 2, E) ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การตั้งค่าโหมดการสื่อสาร และความเร็วในการรับส่งข้อมูลร่วมกับ Touch Screen สำหรับพีแอลซีรุ่น CQM1H

จากนั้นเมื่อตั้งค่าเรียบร้อยแล้วให้เข้าไปที่เมนู “Option” ในหน้าต่าง “PLC Setting” แล้วเลือก “Transfer to PLC” เนื่องจากขณะ Transfer จะไม่มีหน้าต่างแสดงสถานการณ์การ Transfer จะ

สังเกตเห็นแค่เม้าท์เป็นรูปนาฬิกาทราย หากต้องการยืนยันว่าการ Transfer เสร็จสมบูรณ์สามารถตรวจสอบได้โดยเข้าไปที่เมนู “Option” แล้วเลือก “Verify” หากการ Transfer เสร็จสมบูรณ์จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 6 แต่หากการ Transfer ไม่สมบูรณ์จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 7

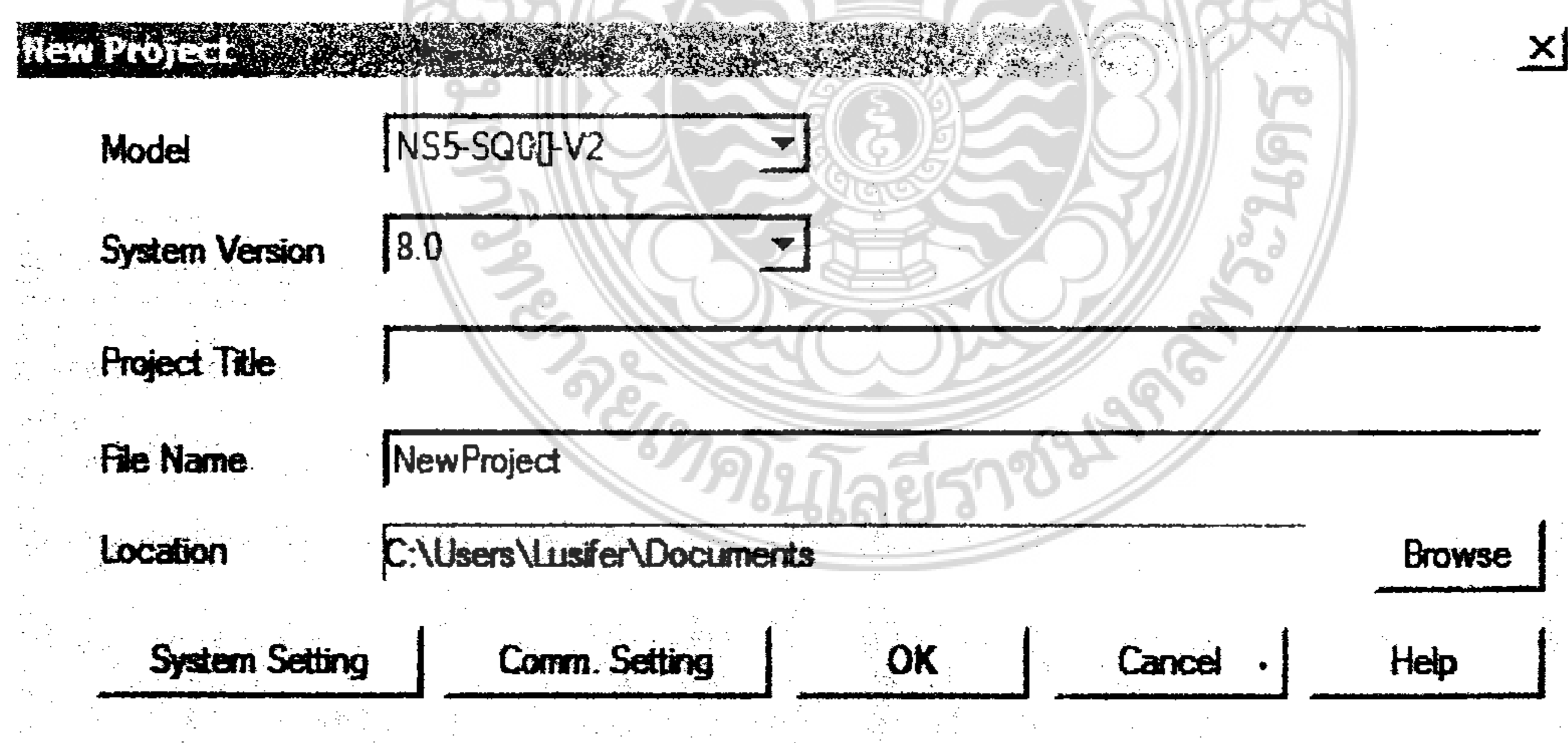


รูปที่ 6 “Verify” เสร็จสมบูรณ์ รูปที่ 7 “Verify” ไม่สมบูรณ์

เมื่อ Verify เสร็จสมบูรณ์แล้วให้ หยุดการเชื่อมต่อระหว่างพีแอลซีและ Computer โดยเข้าที่เมนู “PLC > Work Online” จากนั้นปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้าของตัวพีแอลซีแล้วตั้งค่า Dip SW ขา 5 ไปยังตำแหน่ง OFF แล้วเปิดใหม่ เนื่องจากค่าต่างๆ ที่ตั้งค่าผ่านทางหน้าต่าง PLC Setting จะมีผลก็ต่อเมื่อปิดแหล่งจ่ายของตัวพีแอลซีแล้วเปิดใหม่

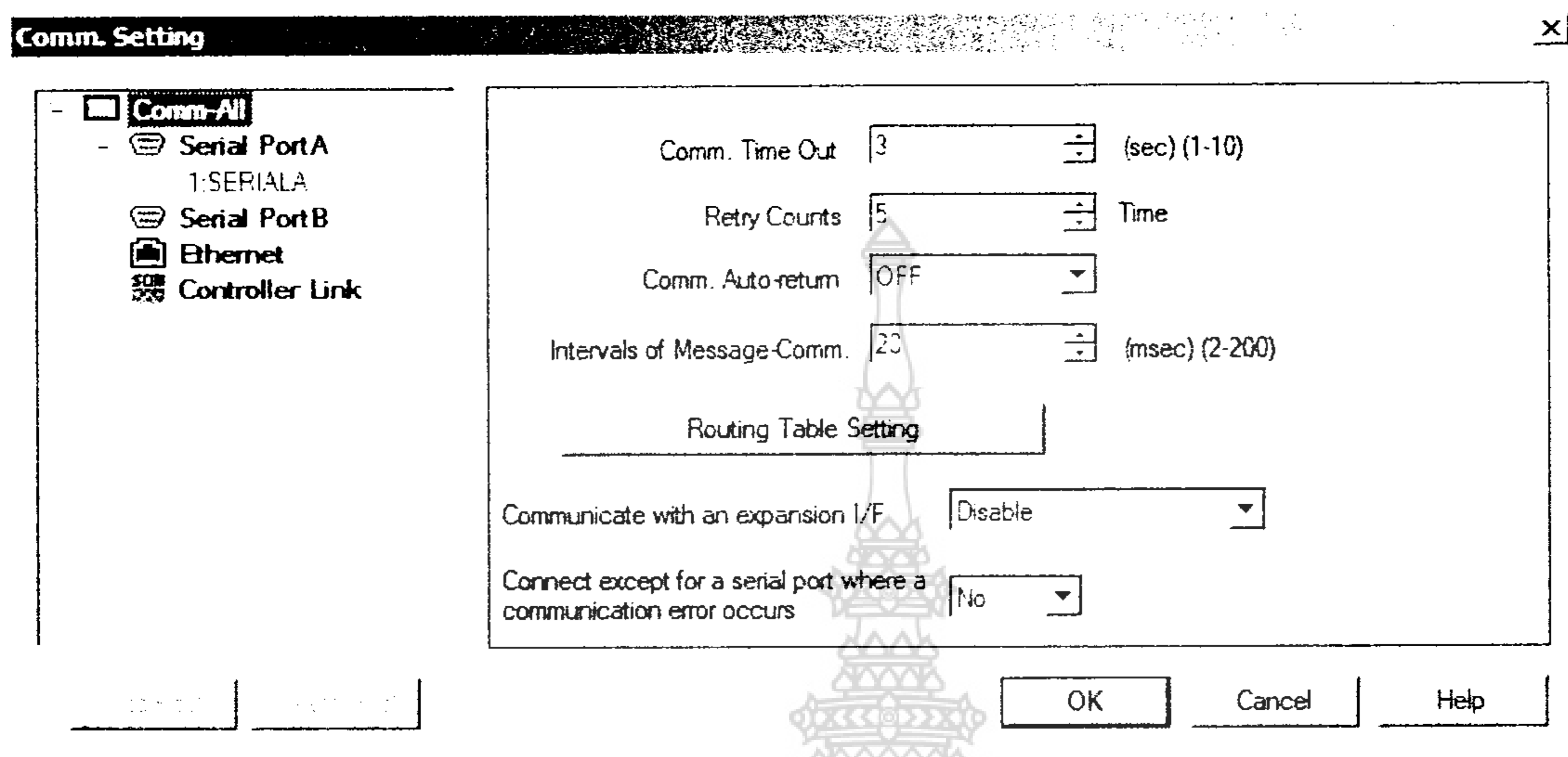
การตั้งค่าการสื่อสารในส่วนของหน้าจอ Touch Screen

ทำการเปิดโปรแกรม CX-Designer ขึ้นมา จากนั้นสร้าง “New Project” โดยเข้าไปที่เมนู File New Project จากนั้นจะปรากฏหน้าต่าง “New Project” ดังรูปที่ 8



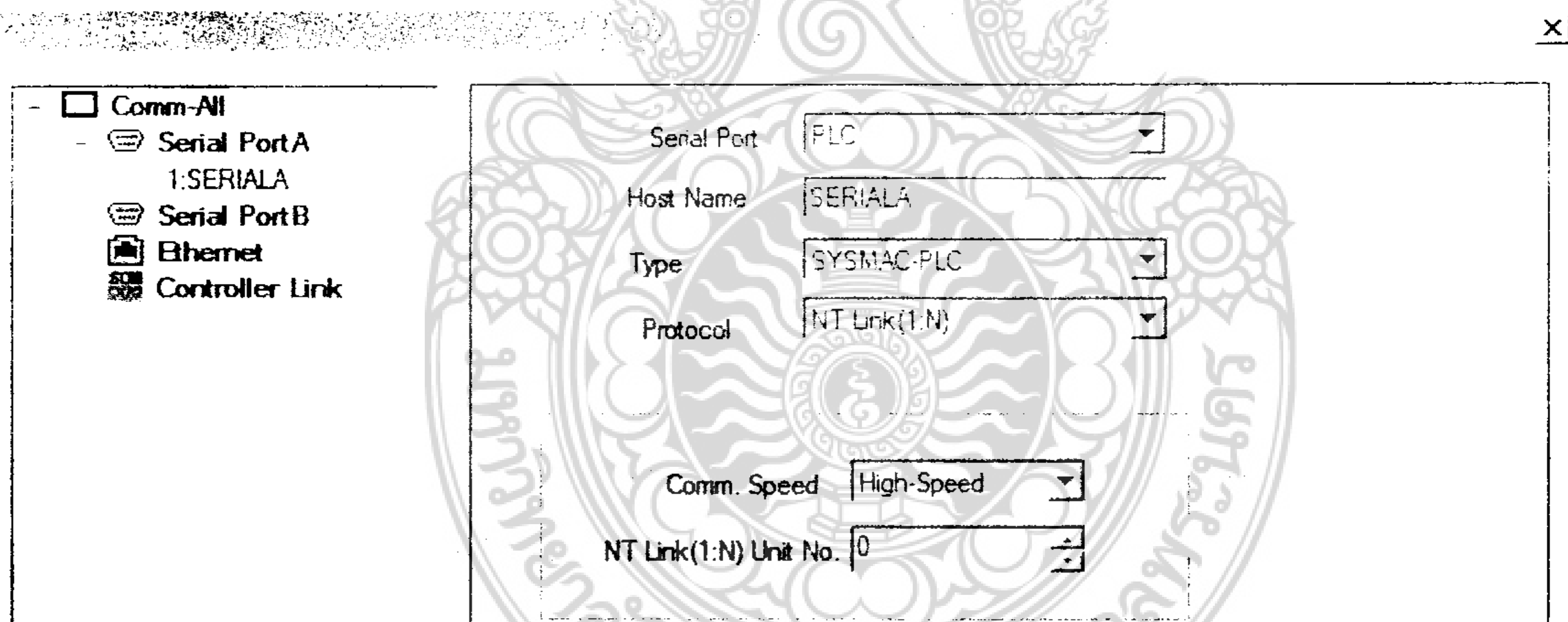
รูปที่ 8 หน้าต่าง “New Project” สำหรับหน้าจอ Touch Screen

จากนั้นให้เลือก “Model” และ “System Version” ให้ตรงกับรุ่นที่ผู้ใช้งานต้องการโดยในที่นี้ผู้เขียนจะเลือกเป็นรุ่น NS5-SQ0 II-V2 ส่วน “System Version” เป็น Version 8 จากนั้นคลิกเลือกที่ปุ่ม “Comm. Setting” จะปรากฏหน้าต่าง “Comm. Setting” ขึ้นมาดังรูปที่ 9



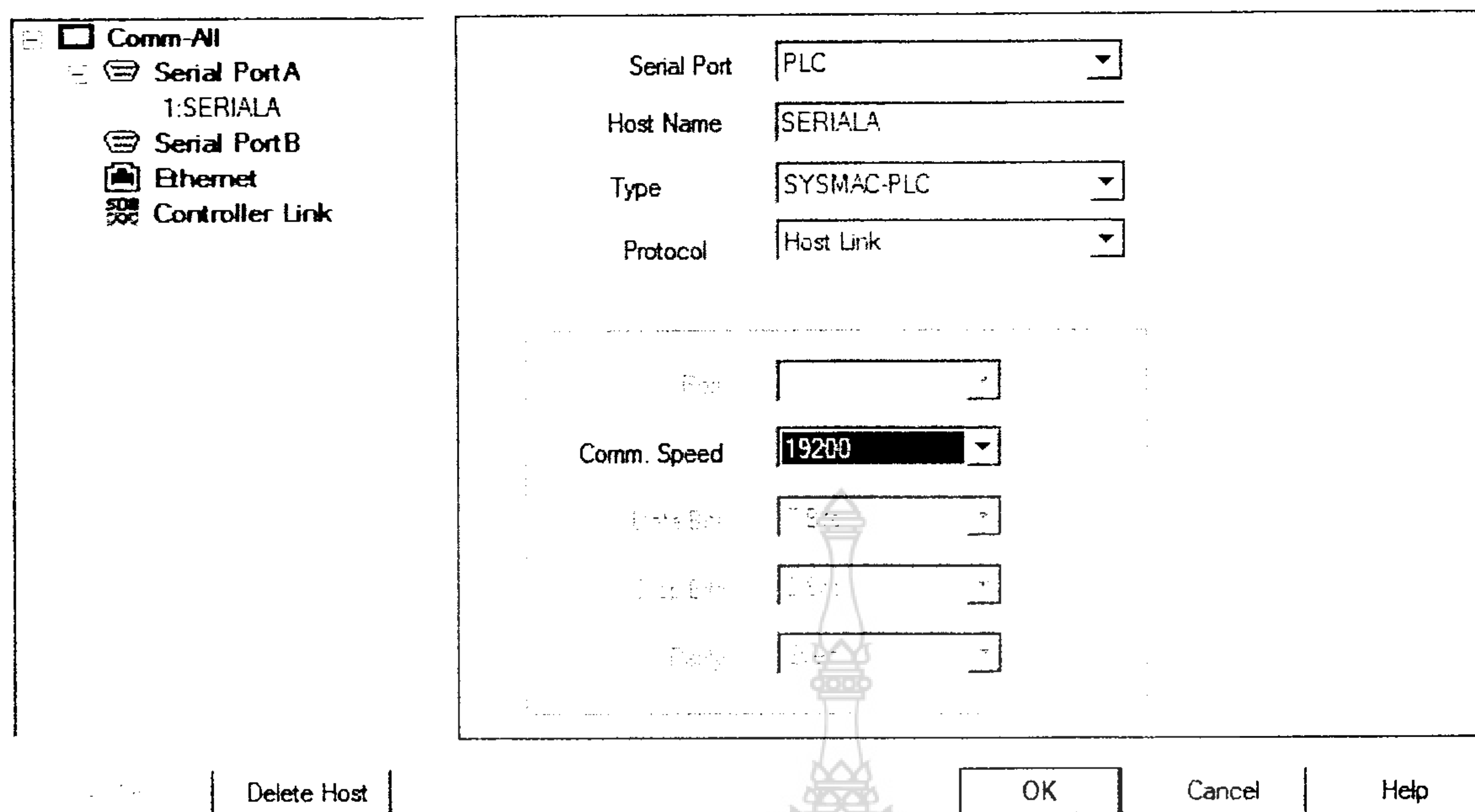
รูปที่ 9 หน้าต่าง “Comm. Setting”

จากนั้นให้คลิกเลือกที่ “1: SERIALA” จะได้หน้าต่างดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 หน้าต่างเมื่อคลิกเลือก “1: SERIALA”

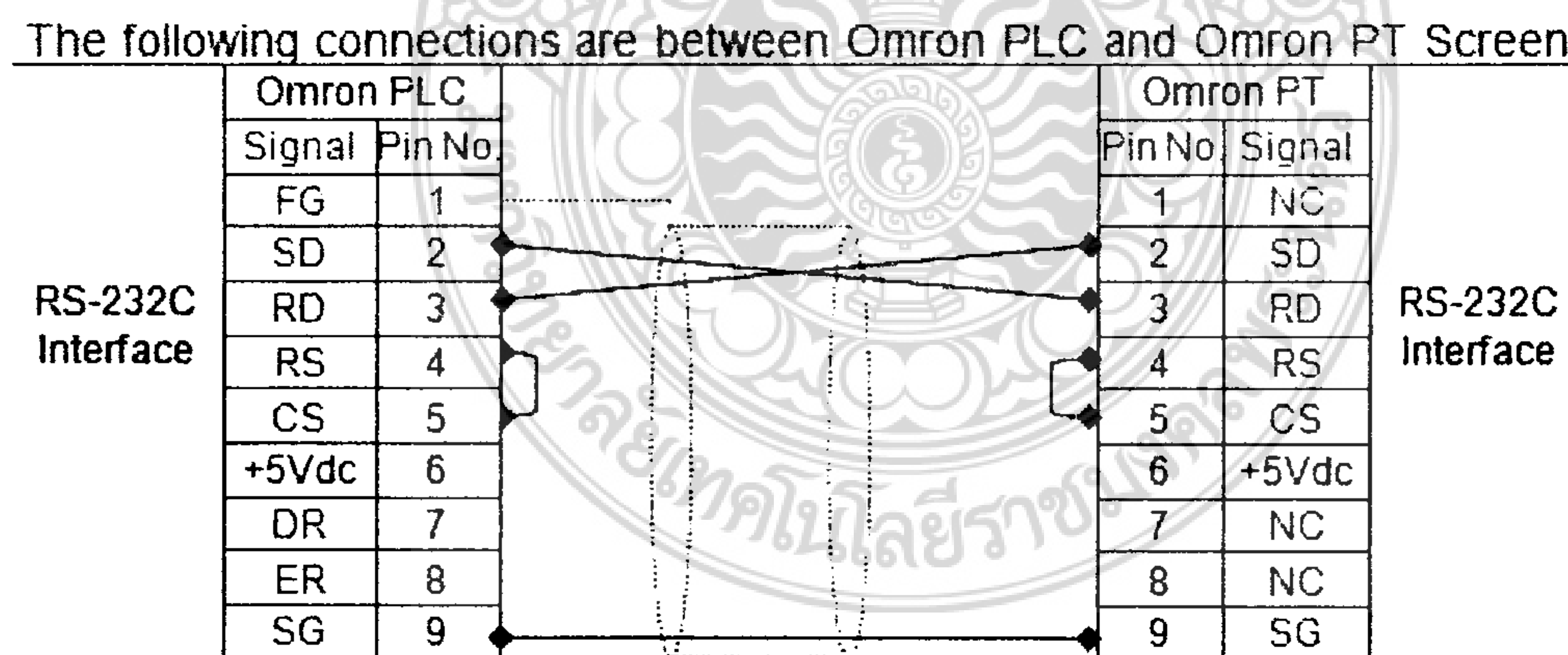
ตรงช่อง Serial Port ให้กำหนดเป็น “PLC” ส่วน “TYPE” เลือกเป็น SYSMAC-PLC ส่วนสำคัญของหน้าต่างนี้จะอยู่ที่ ช่อง Protocol และ Comm. Speed โดยหลักคือต้องกำหนด “Protocol” ให้ตรงกับ “Mode” และกำหนด “Comm. Speed” ให้ตรงกับ Baud Rate ในหน้าต่าง “PLC Setting” ที่ได้ทำการกำหนดค่าไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งในที่นี้จะผู้เขียนต้องกำหนด protocol เป็น Host Link และ Comm. Speed เป็น 19200 ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 การกำหนดค่า Protocol เป็น Host Link และ Comm. Speed เป็น 19200

เมื่อตั้งค่าได้แล้วให้คลิกปุ่ม “OK”

หลังจากนั้นก็ทำการ Transfer ค่า Setting ดังกล่าวไปยังตัว Touch Screen โดยเข้าไปที่เมนู “PT>Transfer > Setting” จากนั้นทำการเชื่อมต่อสายสัญญาณระหว่าง PLC และ หน้าจอ Touch Screen โดยในส่วนของ Touch Screen ให้เชื่อมต่อสายเข้ากับ SERIES A โดยสายสัญญาณเชื่อมต่อระหว่าง PLC และ หน้าจอ Touch Screen จะเป็นไปตามรูปที่ 12

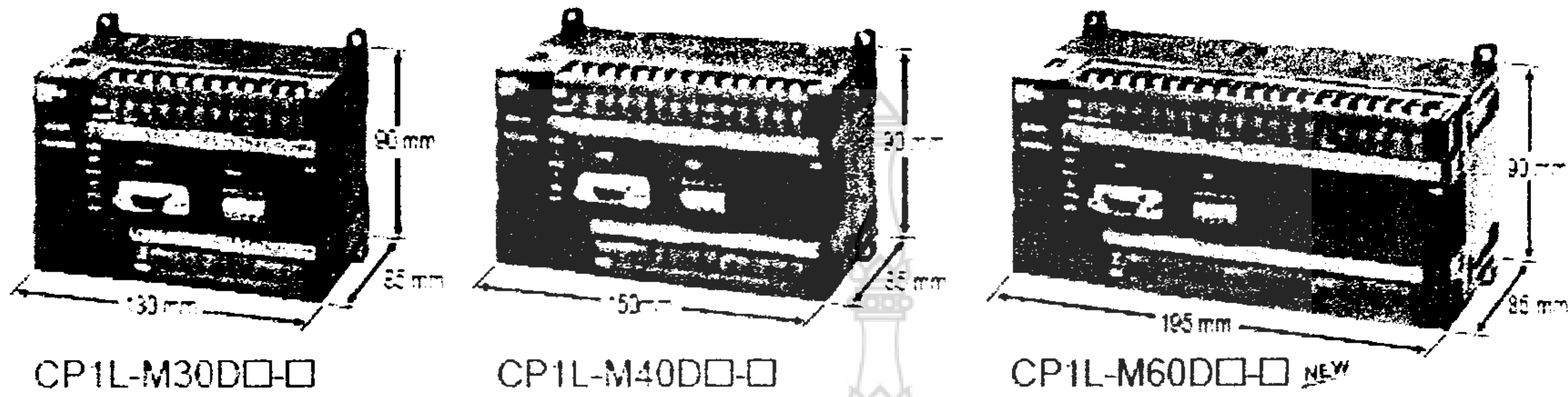


รูปที่ 12 การเดินสายสัญญาณระหว่าง Omron PLC กับ Omron Touch Screen

หากทำการเชื่อมต่อได้จะปรากฏ Screen Data หน้าแรกที่ใช้สร้างไว้บนหน้าจอของตัว Touch Screen แต่หากเชื่อมต่อไม่ได้จะขึ้นข้อความ “Connecting...” ตรงมุมขวาด้านล่างของหน้าจอ Touch Screen

ข. 13 อุปกรณ์ควบคุม

ข 13.1 โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์



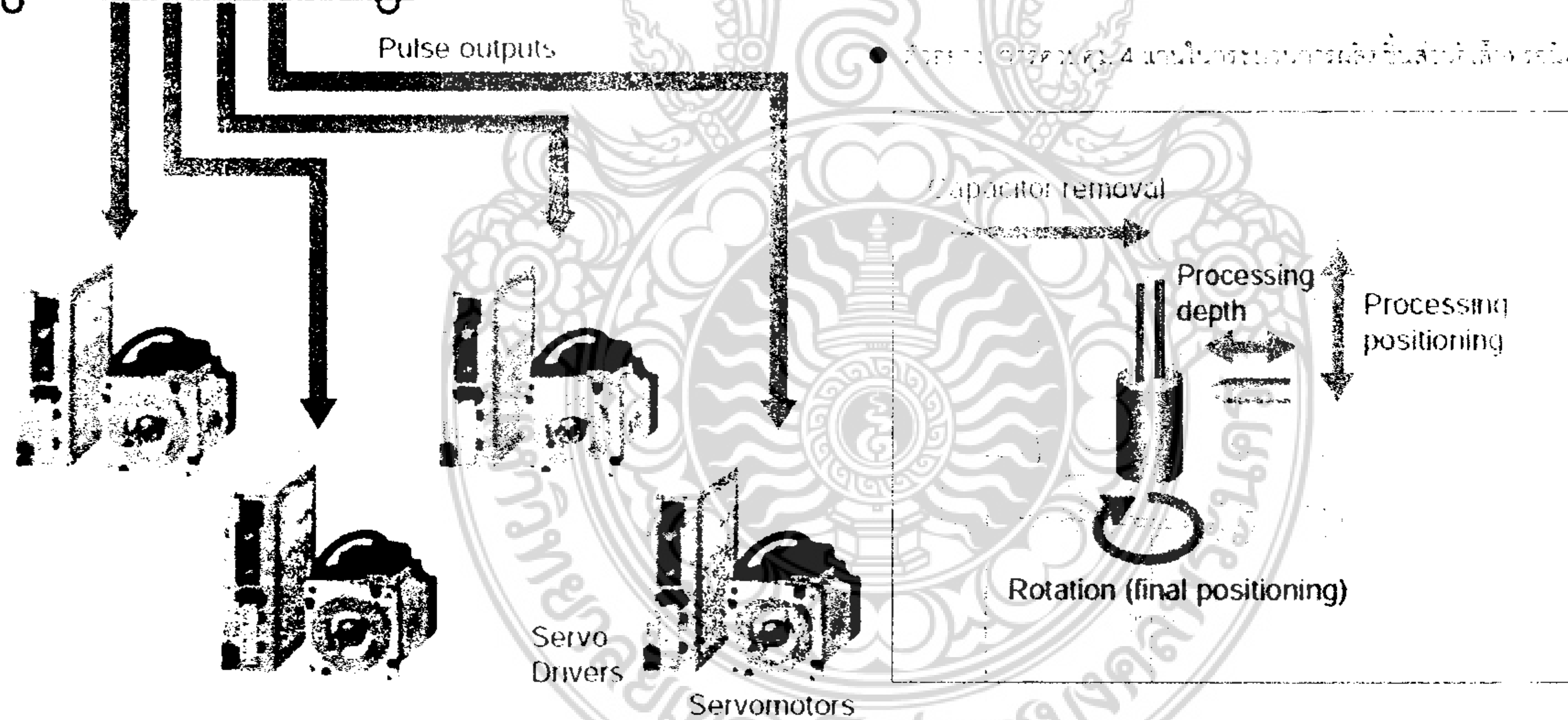
CP1H



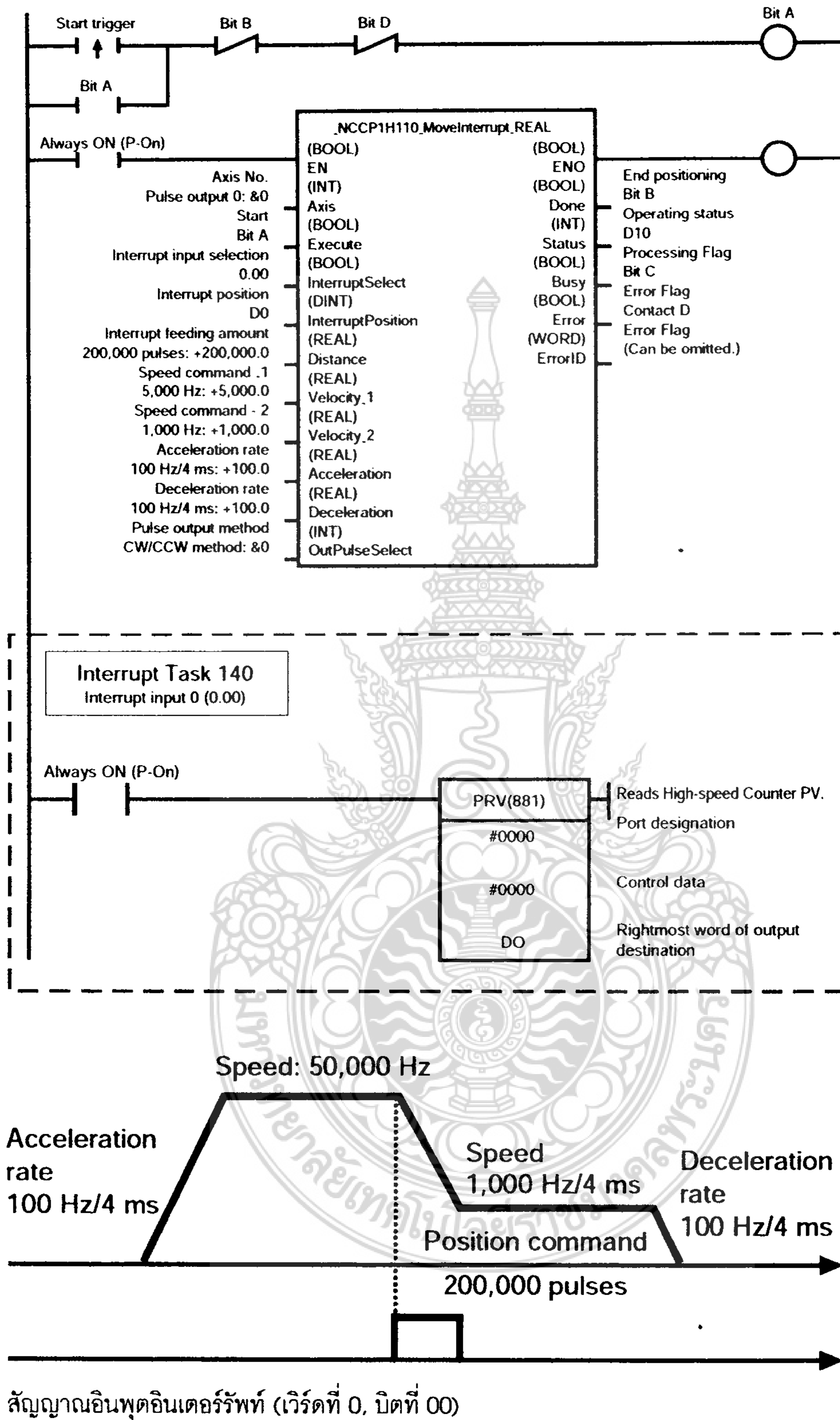
- ฟังก์ชันพัลส์เอาต์พุต

สามารถผลิตพัลส์ที่มีความถี่สูงได้ และสามารถใช้เพื่อควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ที่มีลักษณะเป็นแบบ
 ผลิตพัลส์ที่มีความถี่สูงได้ และสามารถใช้เพื่อควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ที่มีลักษณะเป็นแบบ

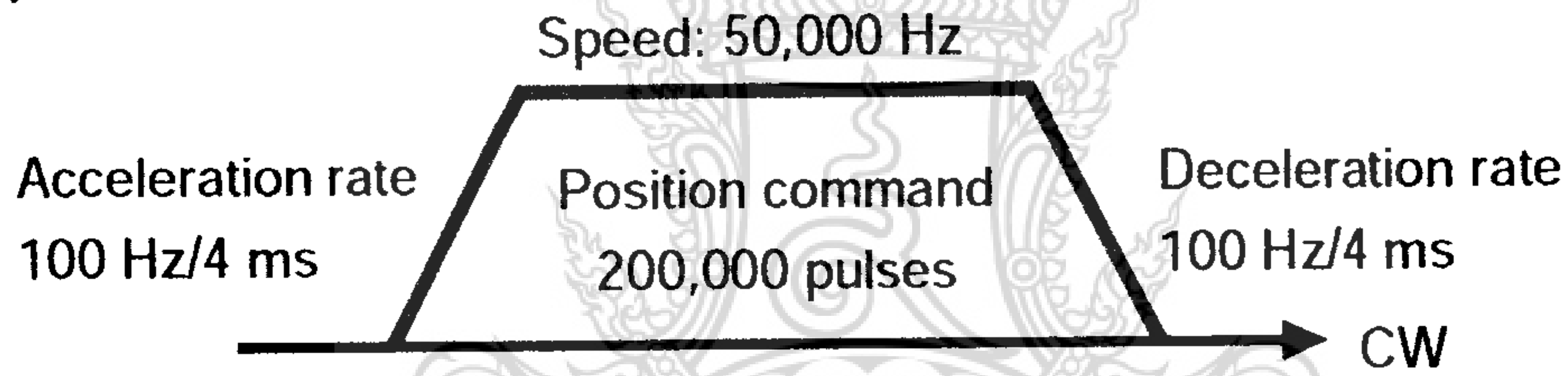
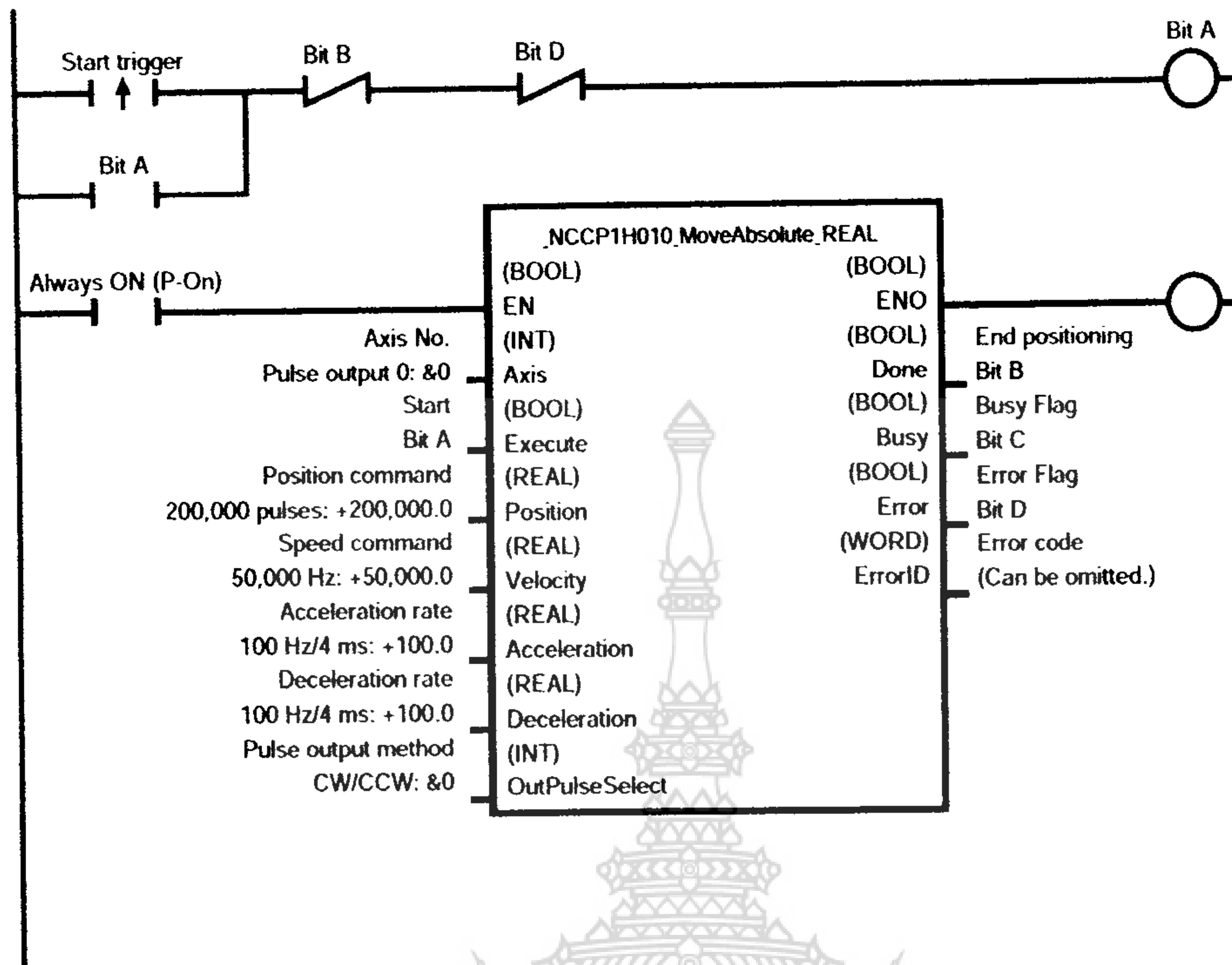
- สามารถผลิตพัลส์ 4 แขนในขณะเดียวกันได้



● การใช้งาน FB สำหรับงาน Interrupt Feeding

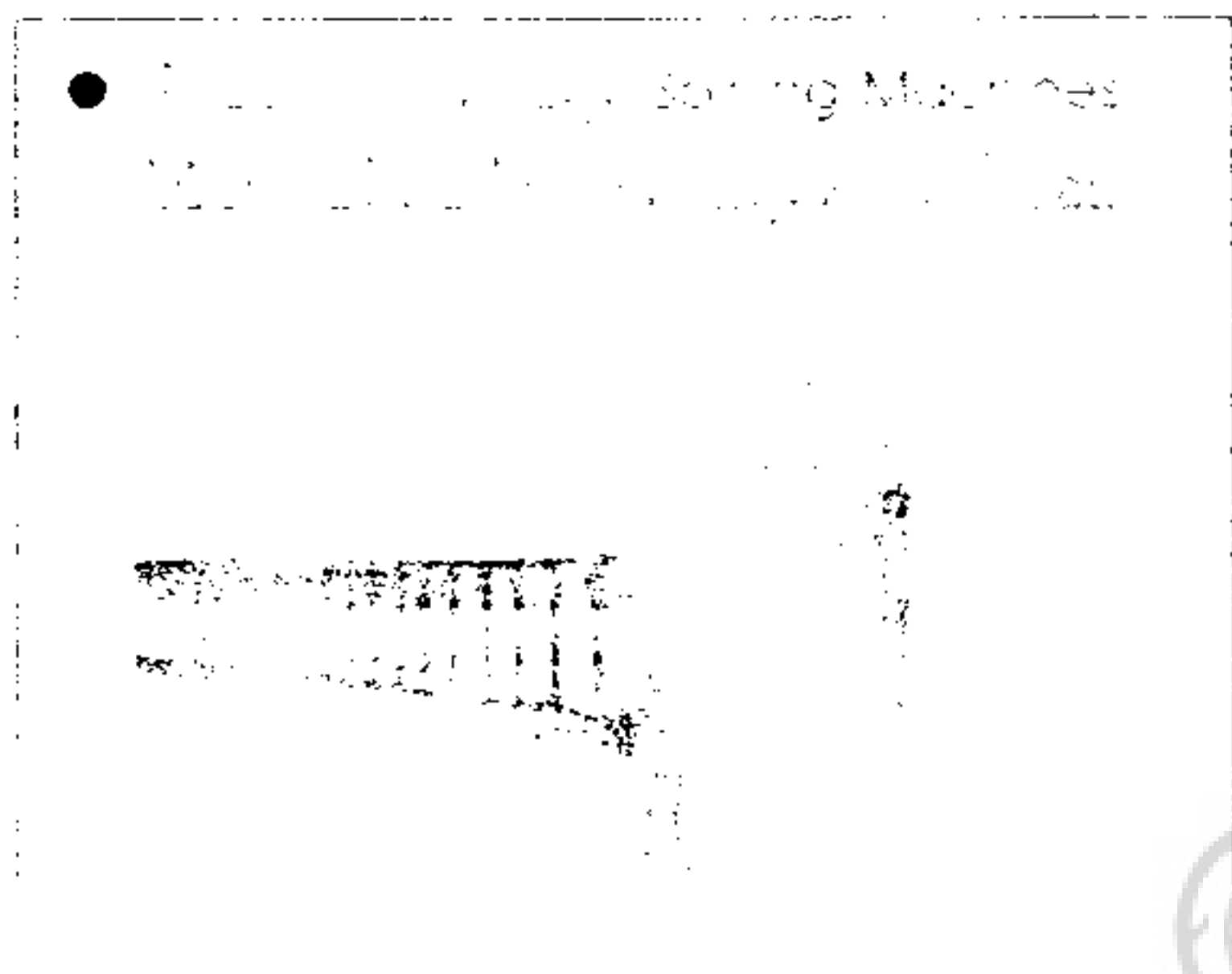
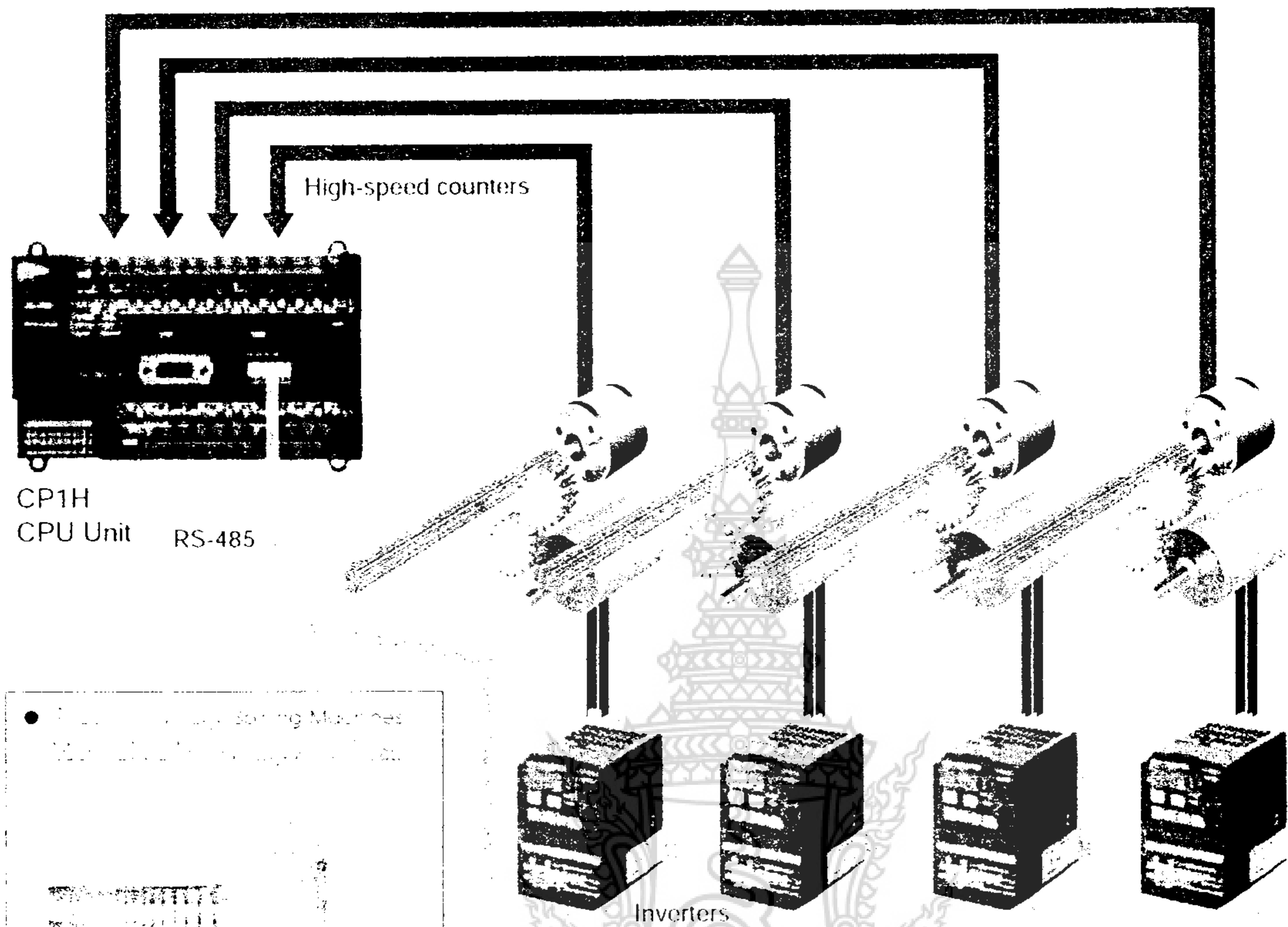


● ตัวอย่าง: การใช้งาน FB สำหรับงานควบคุมตำแหน่ง



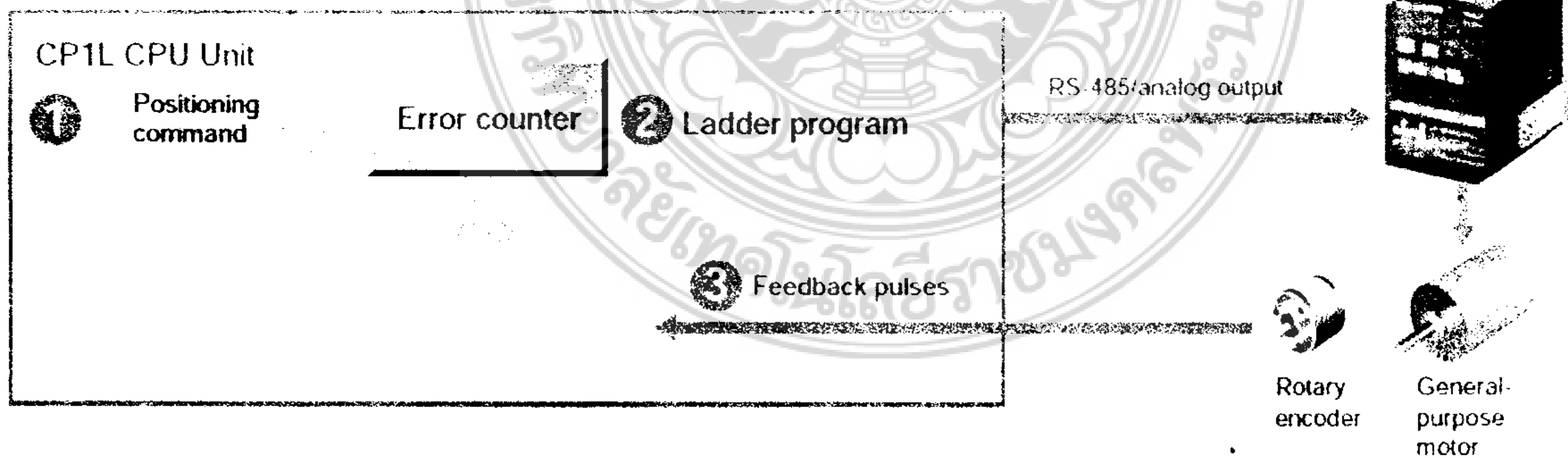
● ฟังก์ชันเคาน์เตอร์ 4 แกน (Single-phase หรือ Differential Phases)

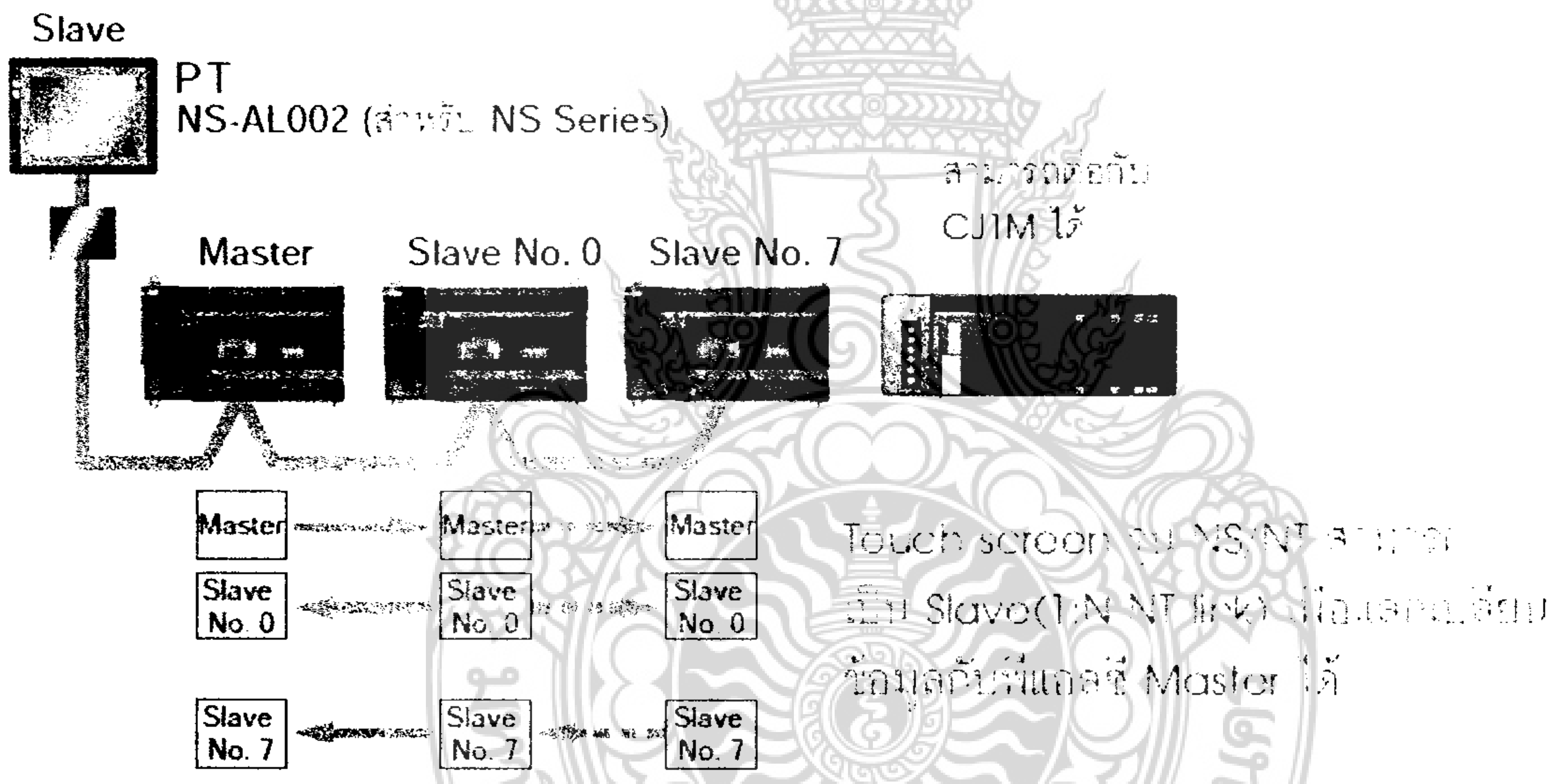
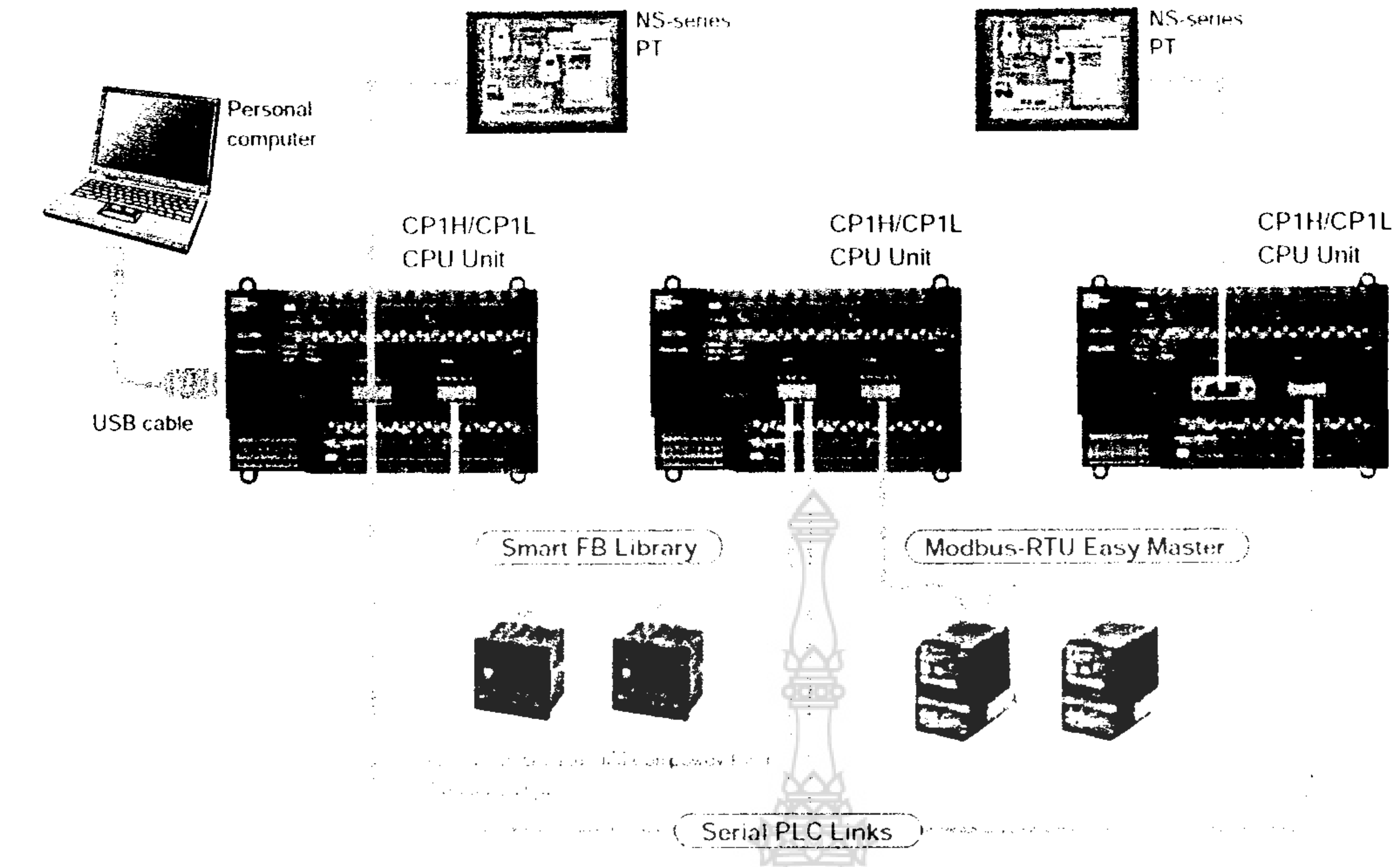
ข้อมูลจากตัวเข้ารหัสหรือเอนโคเดอร์นำมาใช้ประโยชน์ในการควบคุมตำแหน่ง โดยใช้เอนโคเดอร์ได้ เช่น ในงานควบคุม Spindle ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ



■ ฟังก์ชัน Inverter Positioning

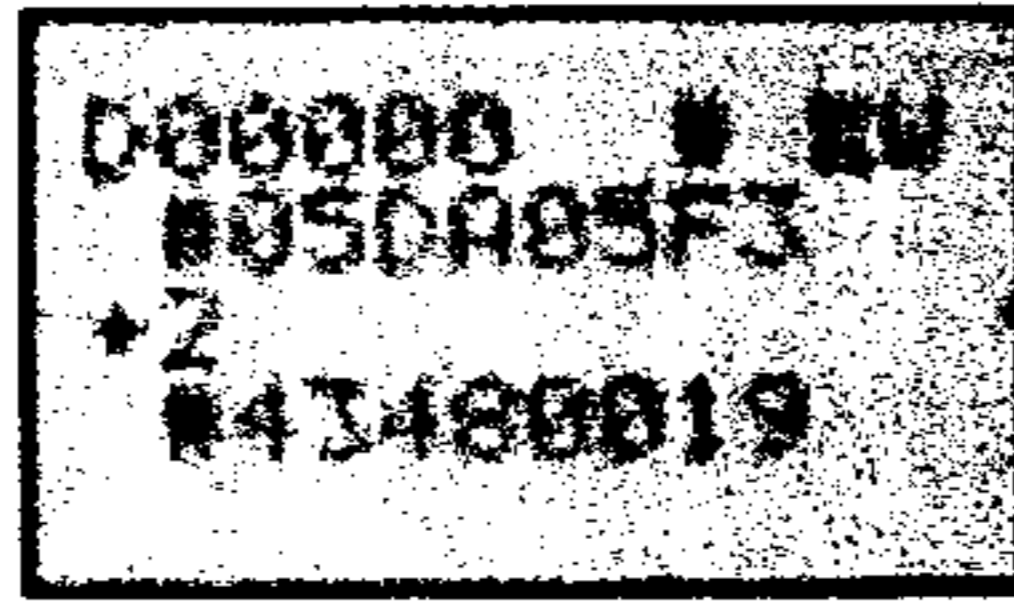
CP1L มีฟังก์ชัน error counter ดังภาพ





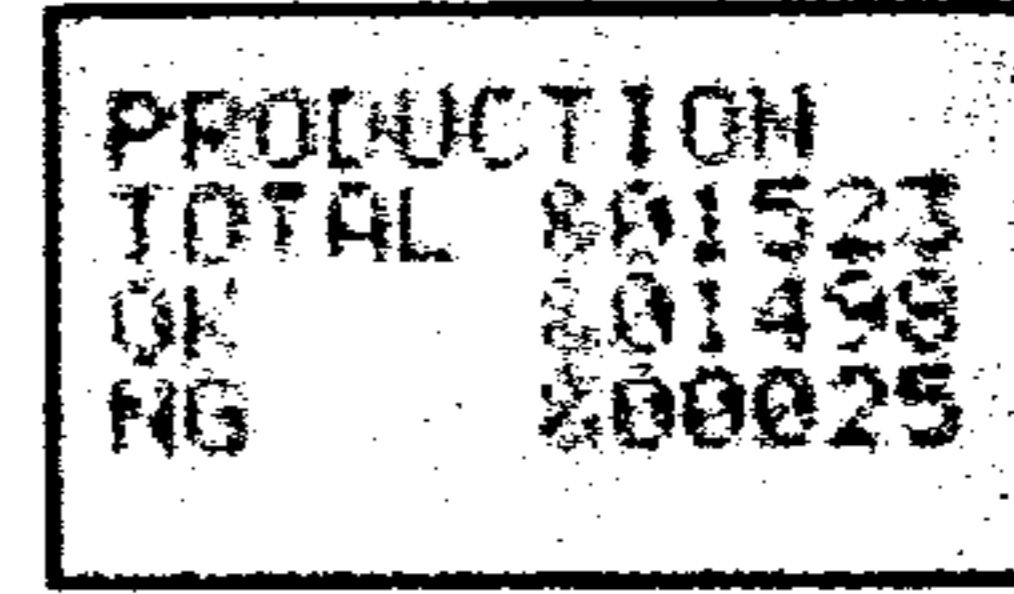
แสดงผลและตั้งค่าข้อมูล

แสดงผลและแก้ไขข้อมูลในหน่วย ความเร็วต่าง ๆ ของ PLC ได้ โดยไม่ต้องต่อคอมพิวเตอร์ ทำได้ การปรับแต่ง สามารถทำได้ง่าย และรวดเร็ว เช่น ค่าไทม์เมอร์



แสดงข้อความ

สามารถแสดงข้อความที่เป็นตัวอักษรได้ถึง 48 ตัวต่อหนึ่งข้อความ ทำให้สามารถแสดงผลการงาน การผลิตหรือการสื่อสารอื่น ๆ กับผู้ใช้งาน โดยไม่จำเป็นต้องใช้จอสี การ สำหรับงานที่มีขนาดเล็กๆ



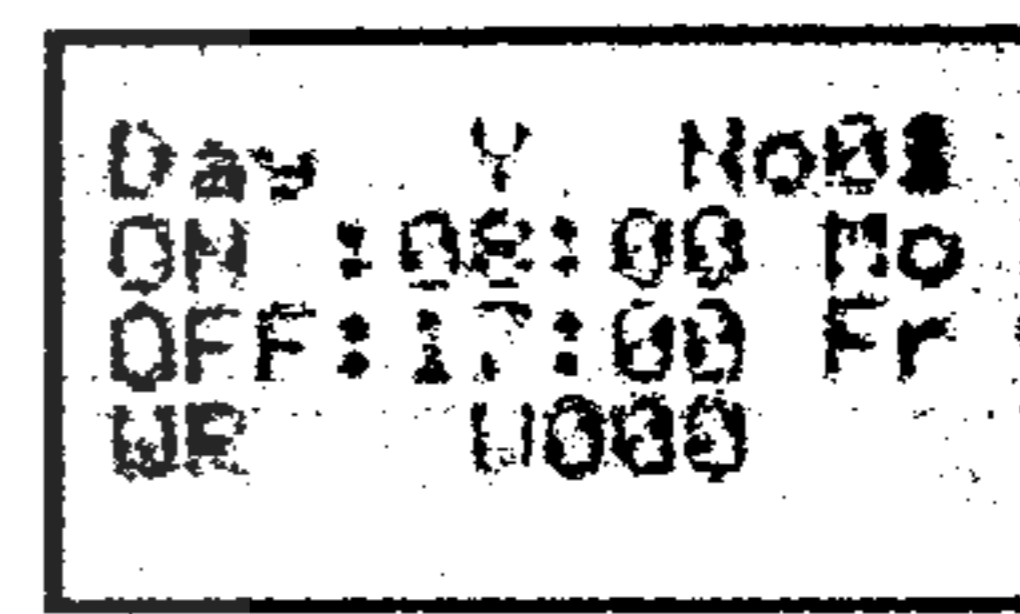
แสดงสถานะข้อผิดพลาด

แสดงแลคโพรที่เปลี่ยนเป็นสีแดงทันทีที่เกิด Error ขึ้นกับ PLC พร้อมทั้งแสดงสถานะของ Error พร้อมรายละเอียดต่างๆ เช่น วัน เวลา และสาเหตุ



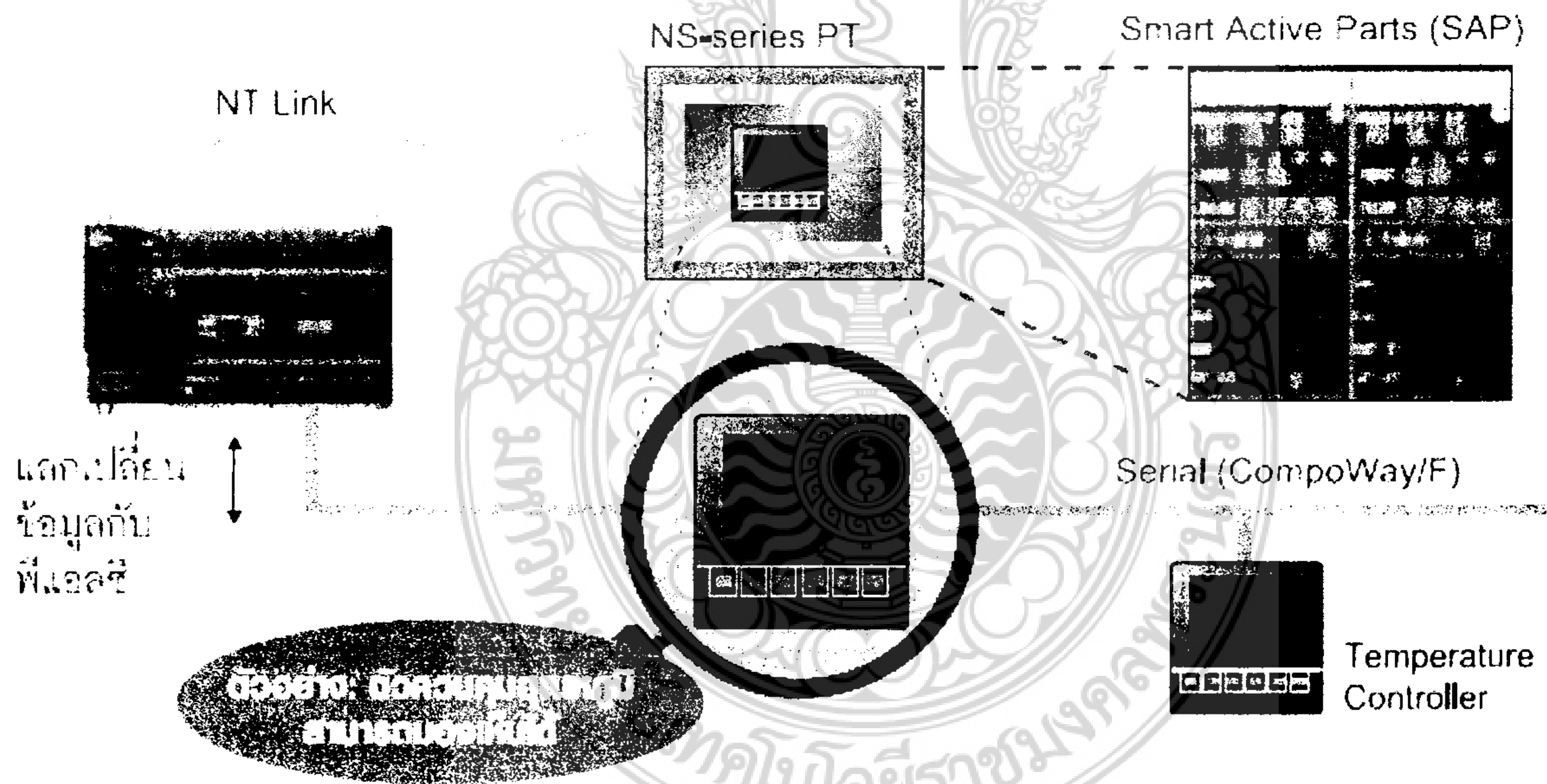
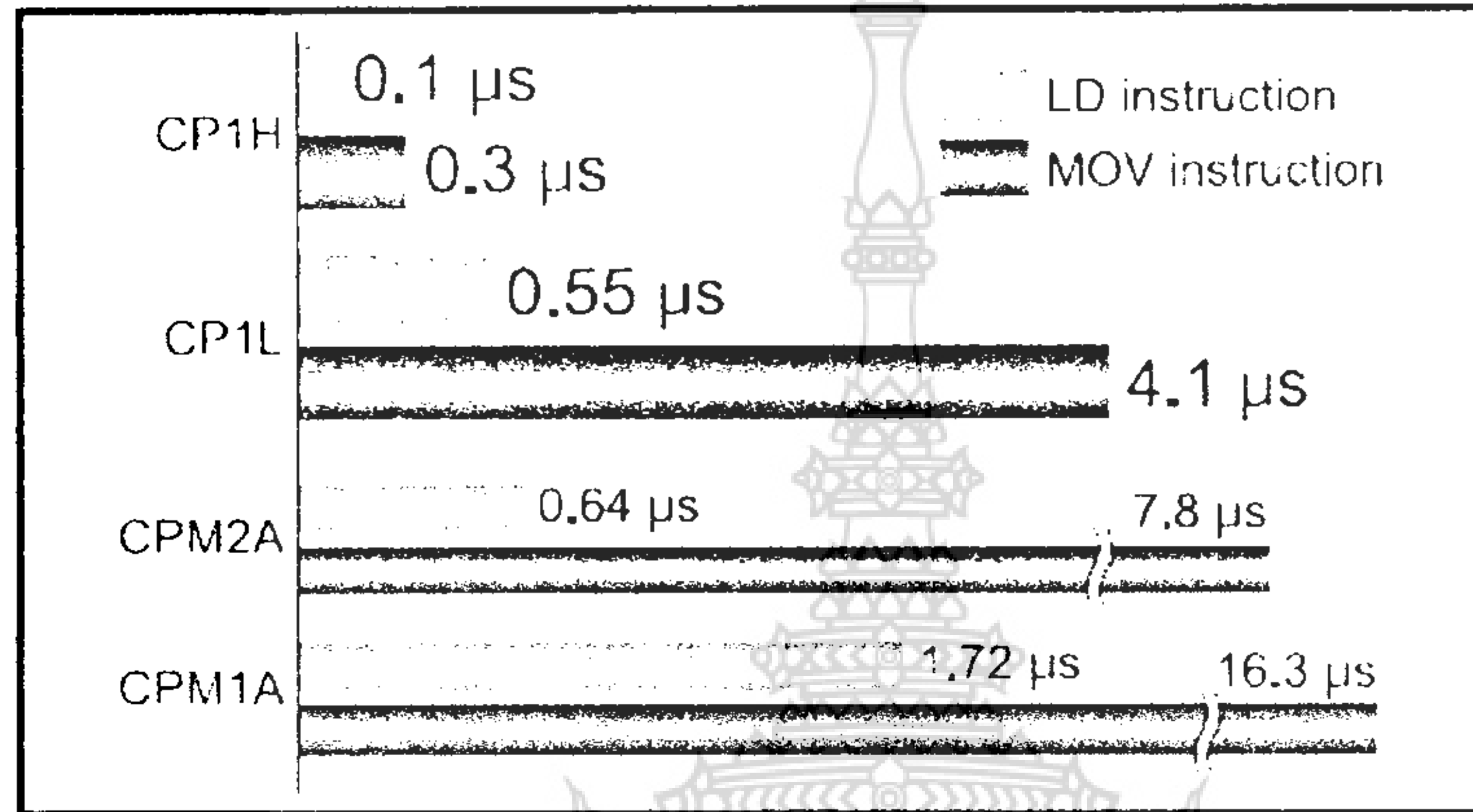
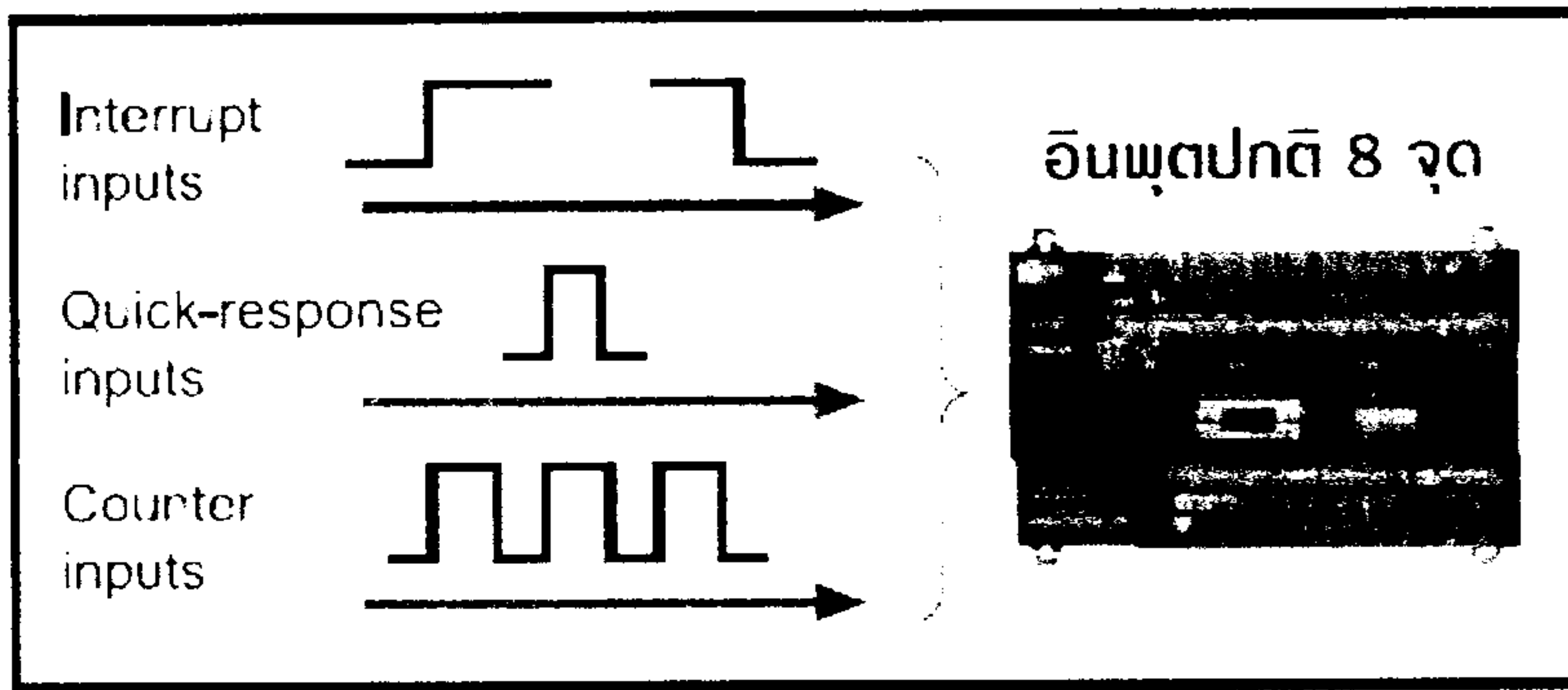
สมาร์ตไทม์เมอร์

เป็นฟังก์ชันเสริมที่จะช่วยให้ PLC ของคุณกลายเป็น Daily Timer, Weekly Timer โดยไม่ต้องเขียนโปรแกรมเพิ่มเติม สามารถตั้งได้ 16 Step

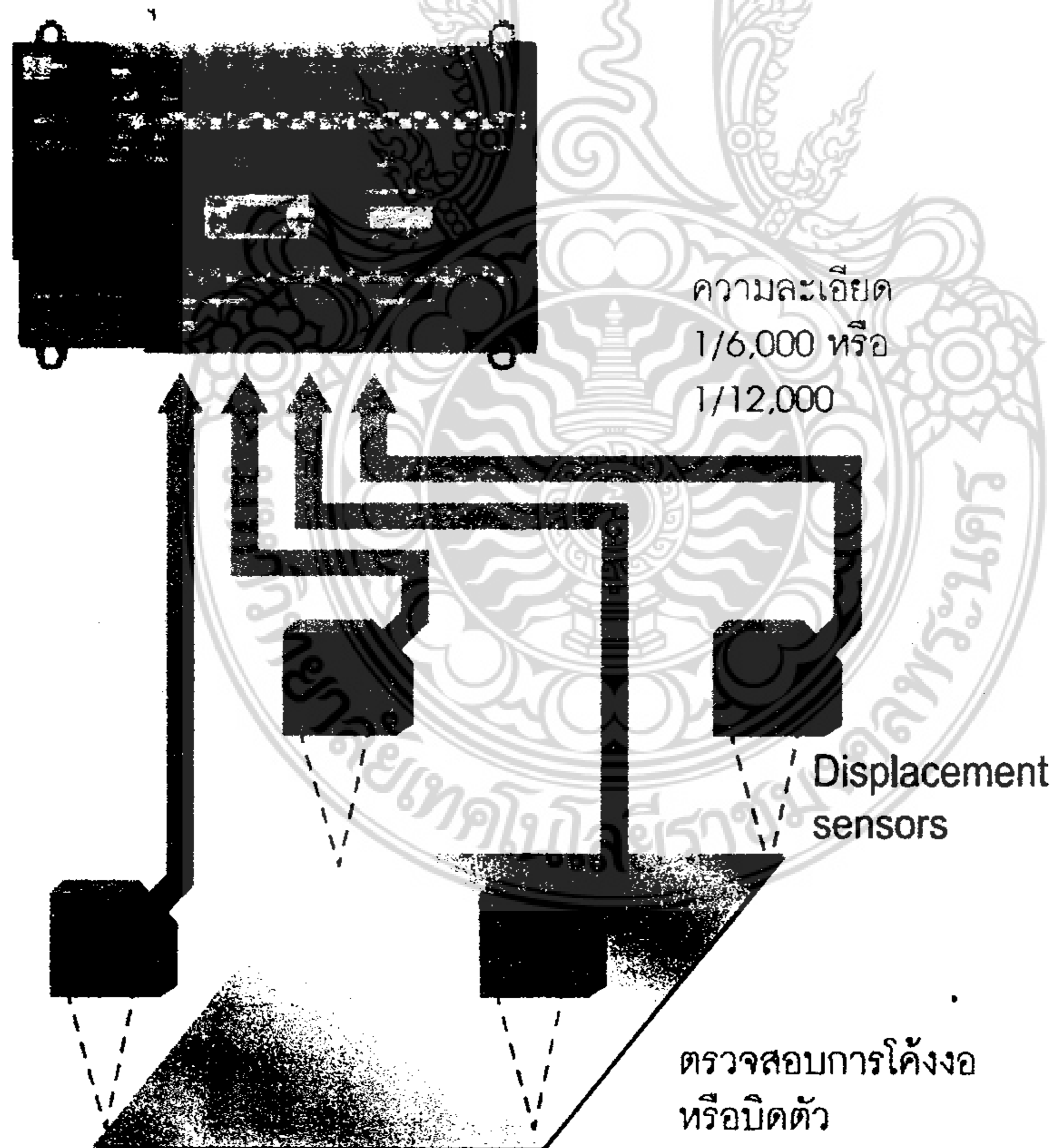
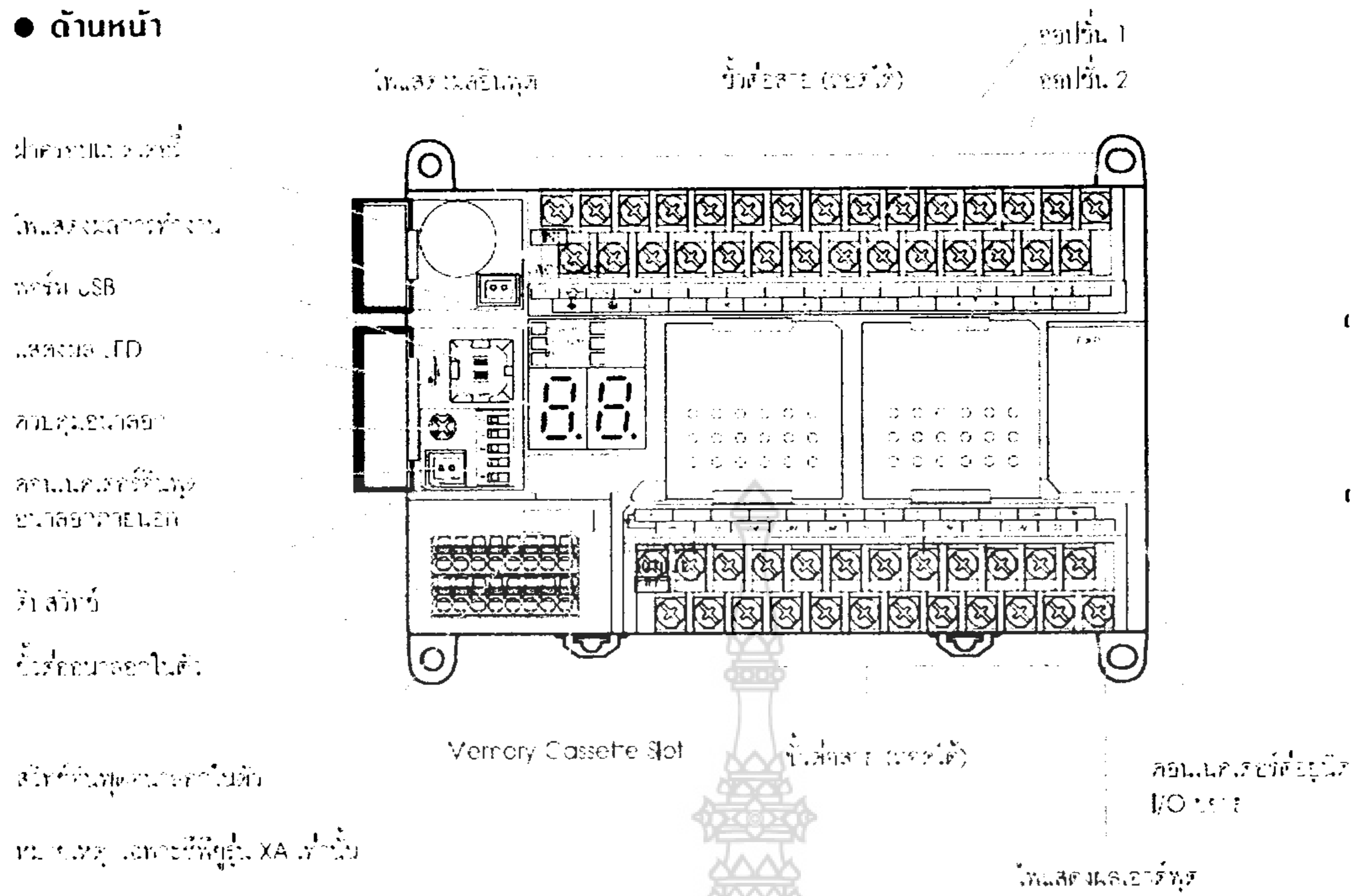


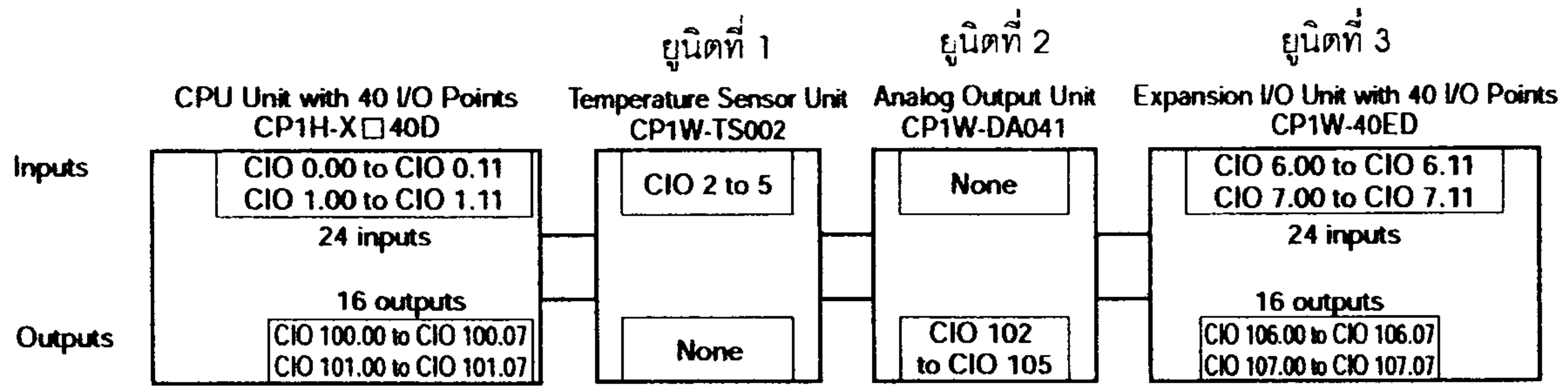
- Structured Text Commands (Keywords)
 - TRUE, FALSE.
 - IF, THEN, ELSE, ELSIF, END_IF.
 - DO, WHILE, END_WHILE.
 - REPEAT, UNTIL, END_REPEAT.
 - FOR, TO, BY, DO, END_FOR.
 - CASE, OF, END_CASE.
 - EXIT, RETURN.
- Operators
 - Addition (+), Subtraction (-), Multiplication (*), Division (/)
 - Parenthesis (brackets), Array Indexing (square brackets [])
 - Assignment Operator (=), Less Than Comparison Operator (<),
 - Less Than or Equal To Comparison Operator (<=),
 - Greater Than Comparison Operator (>),
 - Greater Than or Equal To Comparison Operator (>=),
 - Equals Comparison Operator (=),
 - Is Not Equal To Comparison Operator (<>),
 - Bitwise AND (AND or &), Bitwise OR (OR), Exclusive OR (XOR),
 - NOT (NOT), Exponentiation (**)
- Numerical Functions
 - ABS, SQRT, SQRT, LN, LOG, EXP, SIN, COS, TAN, ASIN, ACOS,
 - ATAN, EXPT
- Arithmetic Functions
 - Exponentiation (EXPT)





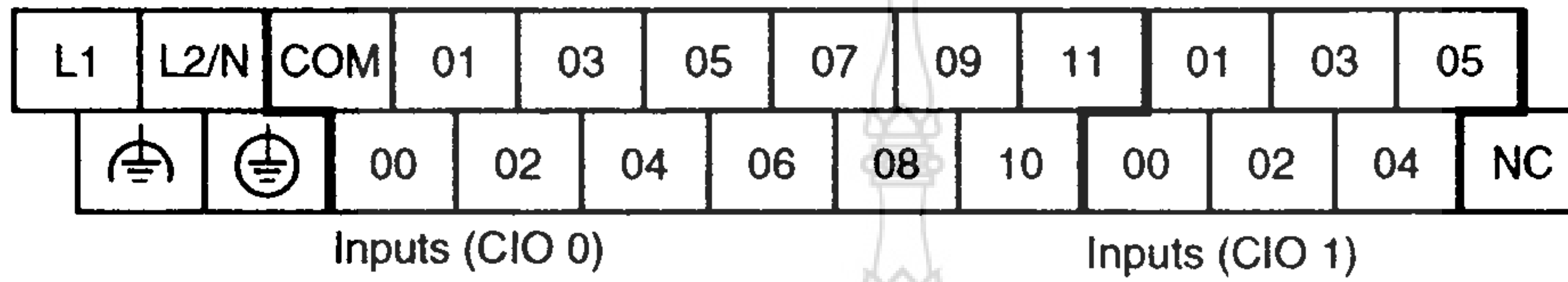
● ด้านหน้า



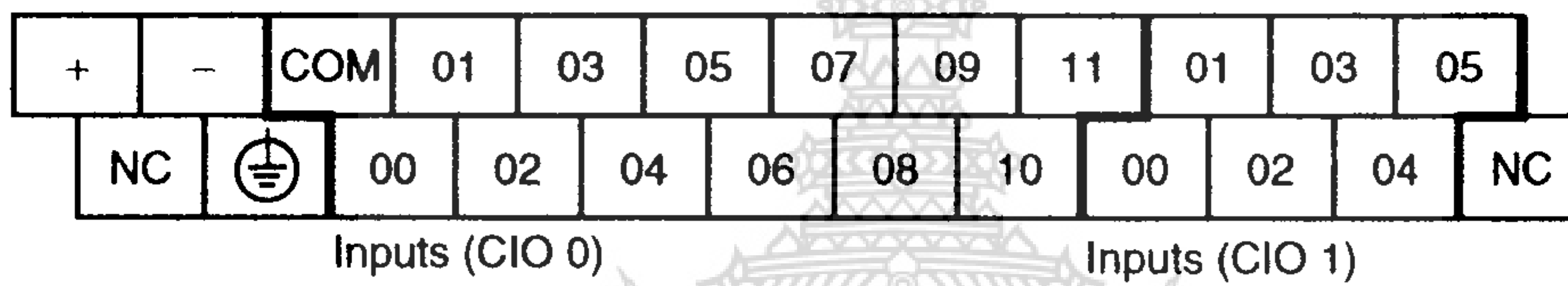


● CP1L (30 จุด)

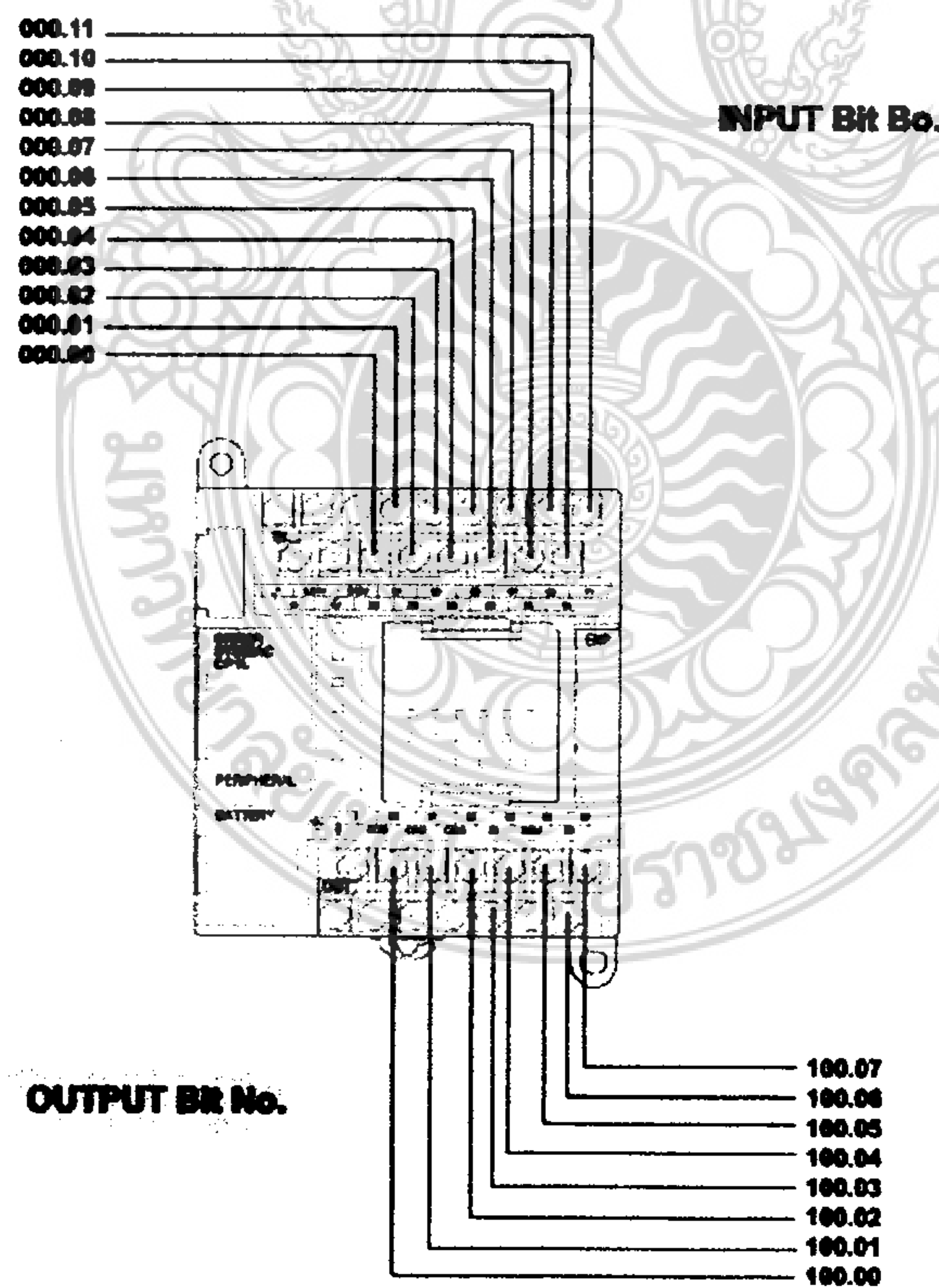
· AC Power Supply Models



· DC Power Supply Models



ข 13.2 ระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ควบคุม



ข 13.3 ระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ควบคุม

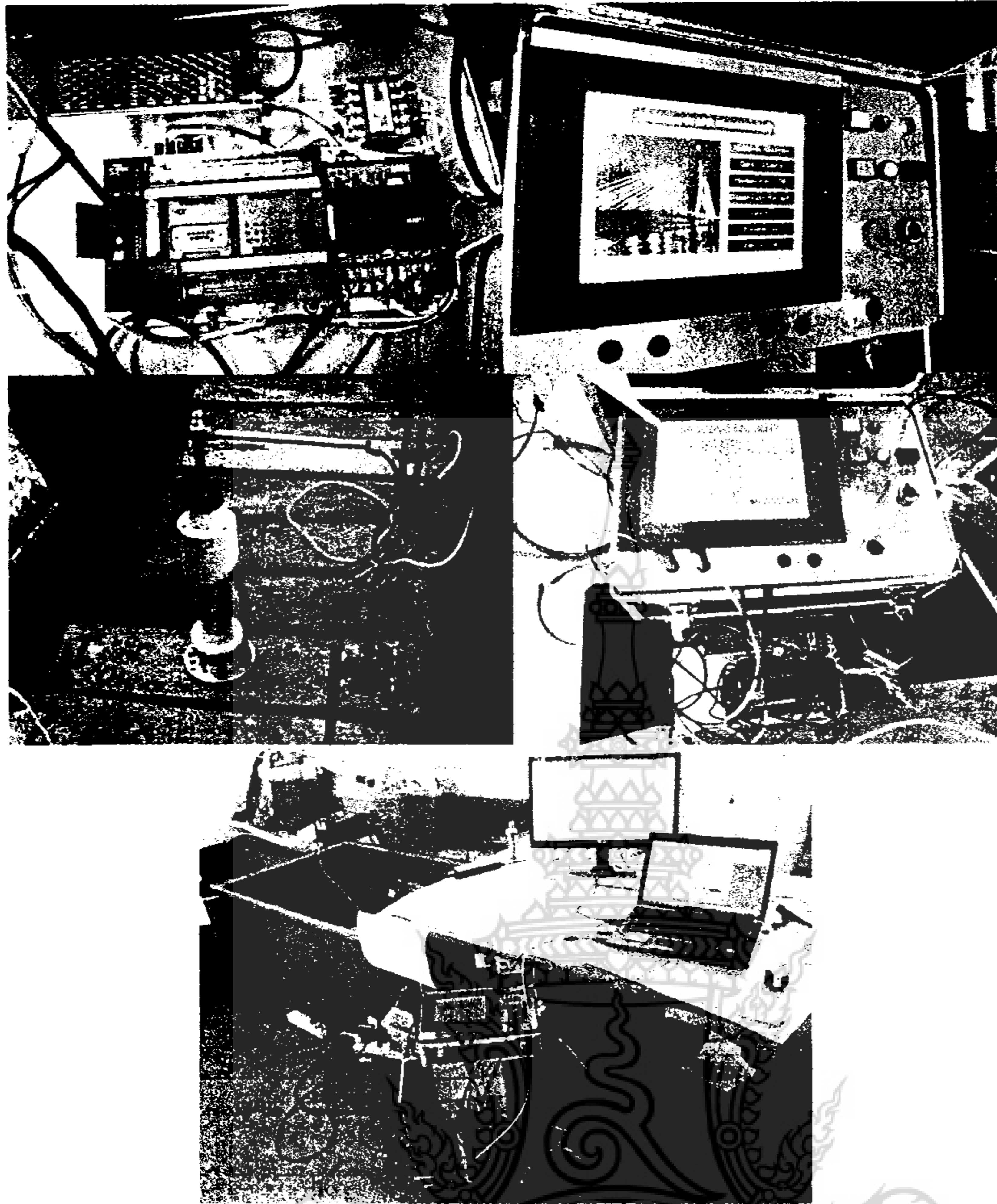
รุ่น	CP1L-L20		CP1L-M30		CP1L-M40		ชื่อรุ่น Expansion
	IN	OUT	IN	OUT	IN	OUT	
จำนวน I/O บนตัว CPU	12 Points 000.00	8 Points 100.00	18 Points 000.00	12 Points 100.00	24 Points 000.00	16 Points 100.00	-
	-	-	-	-	-	-	-
	000.11	100.11	000.11	100.07	000.11	100.07	-
			001.00	101.00	001.00	101.00	
			-	-	-	-	
			001.05	101.03	001.11	101.07	-
Expansion I/O Unit ตัวที่ 1	IN	OUT	IN	OUT	IN	OUT	CP1W-20EDR1 CPM1A-20EDT1
	12 Points 002.00	8 Points 102.00	12 Points 002.00	8 Points 102.00	12 Points 002.00	8 Points 102.00	
	-	-	-	-	-	-	
	002.11	102.07	002.11	102.07	002.11	102.07	
Expansion I/O Unit ตัวที่ 2	ไม่สามารถต่อได้		IN	OUT	IN	OUT	CP1W-20EDR1 CPM1A-20EDT1
			12 Points 003.00	8 Points 103.00	12 Points 003.00	8 Points 103.00	
			-	-	-	-	
			003.11	103.07	003.11	103.07	
Expansion I/O Unit ตัวที่ 3	ไม่สามารถต่อได้		IN	OUT	IN	OUT	CP1W-20EDR1 CPM1A-20EDT1
			12 Points 004.00	8 Points 104.00	12 Points 004.00	8 Points 104.00	
			-	-	-	-	
			004.11	104.07	004.11	104.07	



ภาคผนวก ค

ภาพงานวิจัย





ภาพที่ ๑1 เครื่องมือวัดค่าโพลาไรท์เซชัน