

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ.....	6
1.1 ที่มาและความสำคัญ	6
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	7
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	8
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 การประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต.....	9
2.2 ทฤษฎีการเกิดสนิม	9
2.3 การวัดแบบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์.....	11
2.4 หลักการตรวจวัดโดยใช้การตรวจจับด้วยหลักการคลื่นสัญญาณ	12
2.4.1 หลักการของความถี่คลื่นสัญญาณทางไฟฟ้า.....	12
2.4.2 การออกแบบวงจรการวัดค่า	13
2.5 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าและพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	14
2.6 วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (HIGH FREQUENCY INVERTER).....	16
2.7 การแบ่งประเภทของกลุ่มเหล็กที่ใช้ในงานคอนกรีต	18
2.8 การสร้างความถี่เพื่อการทดสอบ.....	19
2.9 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	24
2.10 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม	27
2.11 ทฤษฎีการตรวจวัด.....	28
2.12 วิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	28
2.13 การวิเคราะห์ข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	30
2.14 ความต้านทานของคอนกรีต	33
2.15 ความต้านทานโพลาไรซ์เซชัน.....	36
2.16 วิธีการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต	38



2.17 การใช้ความถี่ในการวัดค่า	39
2.18 พื้นที่สนามไฟฟ้า.....	41
2.19 วงจรและการประมวลผล.....	42
2.20 วงจรการปรับความถี่ด้วยหลักการการแบ่งแรงดันและกระแส	43
2.21 โปรแกรมคอนโทรลเลอร์	46
2.22 การประมวลผลโปรแกรม.....	46
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	47
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานจัดสร้างและทดสอบ	47
3.1 วิธีการสร้างเครื่องมือวัด.....	48
3.2 วัสดุและปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีต.....	49
3.3 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก	50
3.4 วิธีการวัดค่าด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	51
3.5 การวัดค่าทดสอบด้วยเครื่องมือวัดค่าด้วยคลื่นสัญญาณไฟฟ้า	52
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	56
4.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์	56
4.2 วัดค่าด้วยคลื่นไฟฟ้า.....	58
4.3 บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	64
4.4 ข้อเสนอแนะ	64
บรรณานุกรม.....	65
ภาคผนวก ก	68
ภาคผนวก ข.....	70
ภาคผนวก ค.....	85
ภาคผนวก ง.....	86



สารบัญญภาพ

รูปที่ 2-1 ผลการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณพัลส์รูปที่สี่เหลี่ยม	9
รูปที่ 2-2 แสดงระบบของเซลล์กัลวานิก; การเกิดปฏิกิริยา Oxidation ที่ขั้ว anode และการเกิดปฏิกิริยา Reduction ที่ขั้ว cathode ที่มา : Brown,T.L. and LeMay,H.E.Jr.,(1988)	10
รูปที่ 2-3 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์	14
รูปที่ 2-4 วงจรเรียงกระแสไฟตรง.....	15
รูปที่ 2-5 ตัวอย่างวงจรการขับเกท	15
รูปที่ 2-6 วงจรเชื่อมต่อทางแสง.....	15
รูปที่ 2-7 วงจรอินเวอร์เตอร์	16
รูปที่ 2-8 ตัวอย่างหม้อแปลงที่ใช้ความถี่สูงกว่า	16
รูปที่ 2-9 กราฟแสดง Practical sensitivity	17
รูปที่ 2-10 ชนิดโลหะ	18
รูปที่ 2-11 กลุ่มโลหะ	19
รูปที่ 2-12 ชิปแบบ XT เป็นออสซิลเลเตอร์คริสตอลแบบมาตรฐาน.....	20
รูปที่ 2-13 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ RC เข้ากับ PIC สำหรับค่า Rext ที่น้อยกว่า 2.2 กิโลโอห์ม.....	20
รูปที่ 2-14 แสดงกราฟ Analog IC และ ดิจิตอลไอซี	21
รูปที่ 2-15 แสดงขาใช้งานไดโอดหรือทรานซิสเตอร์.....	21
รูปที่ 2-16 สัญลักษณ์ของ OP-AMP	22
รูปที่ 2-17 แสดงรูปที่แบบจริง Op-AMP	22
รูปที่ 2-18 การสร้างสัญญาณความถี่ด้วย IC SN741	22
รูปที่ 2-19 การสร้างสัญญาณนาฬิกาด้วย IC 555.....	23
รูปที่ 2-20 การขยายสัญญาณด้วย IC 741	23
รูปที่ 2-21 คุณสมบัติด้านความต้านทางของ Op-Amp.....	23



รูปที่ 2-22 การแสดงการเปรียบเทียบการดัดแปลงแหล่งจ่ายไฟชุดเดียวให้เทียบเท่าแหล่งจ่าย 2 ชุด	24
รูปที่ 2-23 วงจรBuffer.....	24
รูปที่ 2-24 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส	24
รูปที่ 2-25 รูปที่แบบจำลองกระบวนการเกิดสนิมของเสริมเหล็กในคอนกรีต	25
รูปที่ 2-26 รูปที่แบบจำลองระยะเวลาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ที่มา : Tuutti, K.(1982).....	26
รูปที่ 2-27 แบบจำลองกระบวนการเสื่อมสภาพโดยคลอไรด์สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะหุ้มคอนกรีตหนา 2 นิ้ว (50 มม.) ที่มา : Cady, P.D., and Weyers R.E. (1983).....	26
รูปที่ 2-28 แผนภาพกลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ที่มา: (Pourbaix, M., 1976)	27
รูปที่ 2-29 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้ทดสอบด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ตามมาตรฐาน ASTM C 876 โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต ที่มา: (ASTM C 876, 2002).....	28
รูปที่ 2-30 ตัวอย่างแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าที่สำรวจได้จาก half-cell potential	30
รูปที่ 2-31 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม(i_{corr})กับ ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ที่มา : (Feliu,S.,Gonzalez,J.A.,and Andrade,C.,1996).....	32
รูปที่ 2-32 เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{corr}) และค่าความต้านทานของ ชิ้นส่วนคอนกรีตที่มา : (Feliu, S., Gonzalez, J.A., and Andrade, C., 1996).....	36
รูปที่ 2-33 การวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยไม่มี	38
รูปที่ 2-34 การเปรียบเทียบความต้านทาน Polarization (Rp) โดยวิธี LPR.....	40
รูปที่ 2-35 การเปรียบเทียบความต้านทาน Polarization (Rp) โดยวิธี EIS.....	41
รูปที่ 2-36 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก 4 บิต แบบ R/2R แลตเตอร์.....	43
รูปที่ 2-37 อนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล.....	43
รูปที่ 2-38 วงจรการแบ่งแรงดันที่มีโหลด	44
รูปที่ 2-39 ความต้านทานต่อขนานกันหลายตัว	45
รูปที่ 2-40 โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์.....	46
รูปที่ 3-2.....	48
รูปที่ 3-1 การหล่อแท่งคอนกรีตเพื่อทดสอบ	49



รูปที่ 3-2 การบ่มแท่งคอนกรีตให้เกิดสภาวะการเกิดสนิมเสมือนจริง.....	49
รูปที่ 3-3 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตและการเร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า.....	51
รูปที่ 3-4 การวัดการเกิดสนิมด้วยวิธีความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์.....	51
รูปที่ 3-5 การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือโดยใช้วิธีความต้านทานโพลารไรซ์.....	52
รูปที่ 3-6 การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือโดยใช้วิธีการส่งคลื่นเพื่อหาความต้านทานโพลารไรซ์.....	52
รูปที่ 3-7 เซนเซอร์ส่งคลื่นความถี่ในการตรวจสอบ.....	53
รูปที่ 3-8 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบผล.....	53
รูปที่ 3-9 การปรับค่าความถี่ควบคุม.....	53
รูปที่ 3-10 การรักษาระดับกำลังเพื่อคงค่าความถี่ควบคุม.....	54
รูปที่ 3-11 การสร้างความสัมพันธ์การรับค่าจากเซนเซอร์ทดสอบคลื่น.....	54
รูปที่ 3-12 การสร้างความสัมพันธ์และเงื่อนไขในการคำนวณค่า.....	54
รูปที่ 4-1 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีตที่เร่งการเกิดสนิมโดยวิธีการของ Half-Cell Potential.....	57
รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลารไรซ์ชั้นของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคอนกรีตไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่ง.....	60
รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลารไรซ์ชั้นของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคอนกรีตใช้กระแสไฟฟ้าเร่ง.....	60
รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคอนกรีตที่ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่ง.....	63
รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคอนกรีตที่ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่ง.....	63



บทที่ 1 บทนำ

การใช้คลื่นสัญญาณไฟฟ้าในการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมในเหล็กเสริมที่อยู่ในโครงสร้างคอนกรีต โดยทั่วไป มักจะเป็นที่นิยมเนื่องจาก หลักการการใช้คลื่นไฟฟ้ามีโอกาสลดปัจจัยและผลกระทบที่รบกวนต่อการวัดการเกิดสนิมของเหล็กที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดเป็นส่วนมาก ความถูกต้องของการวัดจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเล โดยสาเหตุสำคัญส่วนใหญ่ที่ทำให้เหล็กเกิดสนิมจะเกิดจากการที่คลอไรด์ซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปถึงเหล็กเสริมและไปทำลายชั้นฟิล์มที่ป้องกันผิวเหล็กเสริม เมื่อคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตนั้นมีปริมาณมากเพียงพอที่จะทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเกิดสนิมขึ้นสะสมในช่องว่างที่จำกัดของคอนกรีตรอบ ๆ เหล็กเสริมจนทำให้เกิดหน่วยแรงและดันให้คอนกรีตเกิดความเสียหายแตกหลุดล่อนออกมาเป็นผลทำให้กำลังของโครงสร้างลดน้อยลงจนไม่สามารถรับกำลังได้อีกและโครงสร้างจะเกิดการวิบัติ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การทำนายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อการบำรุงรักษาซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตในปัจจุบันจึงมีค่าใช้จ่ายสูงมากและเป็นงบประมาณหลักของประเทศในระบบสาธารณสุขภาคที่ต้องมีการควบคุมปริมาณวางแผนการบำรุงรักษาในการที่ทำให้โครงสร้างกลับคืนมาอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้อีก สามารถกระทำได้โดยการปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตและเหล็กเสริมให้มีคุณสมบัติที่มีความคงทน การปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตอาจทำได้ แต่กระบวนการสำคัญก่อนที่จะทำการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตนั้น ควรที่จะต้องแก้ปัญหาของการเกิดสนิมของเหล็ก โดยใช้วิธีการตรวจสอบและประเมินค่าอัตราการเกิดสนิมซึ่งเป็นวิธีทดสอบที่ไม่ทำลายเป็นเทคนิคสามารถบอกเตือนให้รู้ล่วงหน้าของการตรวจพบเจอเมื่อเหล็กเกิดสนิม การวัดค่าปริมาณการเกิดสนิมของเหล็กโดยการทดสอบแบบไม่ทำลายสามารถวัดค่าได้โดยใช้การวัดค่าอัตราการเกิดสนิมด้วยวิธีทางปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ซึ่งเครื่องมือโดยทั่วไปสามารถหาซื้อได้จากต่างประเทศ แต่ราคาแพงมากซึ่งยังไม่มีแพร่หลาย และอาจจะไม่เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมของประเทศไทย

การตรวจสอบและประเมินสภาพโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพโดยอาศัยเครื่องมือในการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย ซึ่งผลที่ได้จากวิธีการนี้เป็นค่าอัตราการเกิดสนิม (Corrosion Rate) ของเหล็กเสริมในคอนกรีต เป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับจัดเตรียมการประเมินสภาพและวางแผนการบำรุงรักษาซ่อมแซม โครงสร้างซึ่งจะเป็นราคาค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้าง

ปัจจุบันในต่างประเทศได้มีบริษัทผู้ผลิตและพัฒนาเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้แก่บริษัท 1. K.C. Clear, Inc (3LP-NBS1) 2. GEOCISA (Gecor6) และ 3. Nippon Steel Corporation (Corro Catch) ซึ่ง 2 วิธีการแรกใช้หลักการของ Linear Polarization โดยที่ไม่มีการจำกัดขอบเขตของกระแสไฟฟ้า (ไม่มี guard electrode, GE) และมี guard electrode ตามลำดับ สำหรับวิธีการที่สามใช้หลักการของ Superimpose Current Pulse โดยการใช้ความถี่สูงและต่ำ เพื่อให้กระแสไฟฟ้ามีค่า



สม่ำเสมอในขอบเขตที่จำกัด ซึ่งเป็นวิธีการที่นำไปใช้วัดค่าความต้านทานของเหล็กเสริมในคอนกรีต มีอุปกรณ์หลัก 3 ส่วนประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า Counter Electrode (CE) เป็น Probe ใช้เป็นตัวส่งสัญญาณของกระแสไฟฟ้าไปยังเหล็กเสริมที่อยู่ห่างออกไปในคอนกรีต ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode) และขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working Electrode)

ดังนั้นในการพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องมือที่ใช้วัดค่าปริมาณการการเคลื่อนไฟฟ้าจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง และจะทำให้สามารถลดความผิดพลาดของการวัดค่าซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับการแก้ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตให้มีความถูกต้องมากขึ้น ปัญหาของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเป็นปัญหาที่แก้ไขได้แต่มีความยุ่งยากซับซ้อนมากซึ่งเกิดจากปัจจัยที่หลากหลาย ดังนั้นเมื่อโครงสร้างคอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพจึงต้องหาวิธีการที่จะช่วยลดปัญหาดังกล่าวให้มีความรุนแรงลดลงให้ได้มากที่สุด ซึ่งในปัจจุบันได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งในและต่างประเทศ แต่การพัฒนาประสิทธิภาพเครื่องมือที่จะใช้บอกเตือนให้รู้ล่วงหน้าสำหรับการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตยังไม่มีการศึกษาพัฒนากันอย่างจริงจังและแพร่หลายมากนักโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทย ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้หากทำบรรลุวัตถุประสงค์ก็จะเป็นการช่วยลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในด้านงบประมาณของประเทศไทยในการบำรุงรักษาซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตและต้นทุนของเครื่องมือที่จะต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาแพงมากและนอกจากนั้นยังช่วยส่งเสริมผลักดันให้มีการพัฒนาเครื่องมือในวงการอุตสาหกรรมประเภทนี้ให้เทียบเท่าหรือก้าวหน้ากว่าในต่างประเทศที่มีอยู่ในปัจจุบัน นอกจากนี้ผลที่ได้จากโครงการวิจัยยังสามารถนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลที่เป็นต่อไปเพื่อเป็นแนวทางในการผลิตเครื่องมือวัดค่าอัตราการเกิดสนิมสำหรับในประเทศไทยให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. พัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้วัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยประยุกต์ใช้หลักการความถี่สัญญาณไฟฟ้าด้วยคลื่น
2. ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความต้านทานโพราไรต์เซชัน เช่น การเคลื่อนย้ายตำแหน่งและขนาดต่างๆ ของ Probe ที่อยู่เหนือเหล็กเสริมที่มีผลทำให้ Polarized area รอบๆ เหล็กเสริมมีการเบี่ยงเบน
3. ประเมินและตรวจสอบประสิทธิภาพการใช้งานของเครื่องมือที่ใช้วัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตด้วยหลักการความถี่สัญญาณไฟฟ้าด้วยคลื่น
4. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิม (E_{corr}) และกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{corr}) ในเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตโดยวิธีการ Linear Polarization Resistance (R_p) เพื่อประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
5. เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดสนิมเทียบกับระยะเวลา



1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาปรับปรุงและแก้ปัญหาความผิดพลาดการวัดทางไฟฟ้าในการไหลของกระแสไฟฟ้าเพื่อหาค่าการเกิดสนิมของเหล็กโดยออกแบบ Probe ซึ่งเป็นตัวรับและส่งสัญญาณมีลักษณะเป็นแบบวงแหวน โดยทำการทดสอบหาความเหมาะสมในหลากหลายขนาดและทำการสร้างเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้เป็นแหล่งจ่าย-รับไฟฟ้า ที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับใช้ในการวัดค่าของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่มีค่าต่ำมากด้วยคลื่นความถี่ เพื่อใช้ในการวัดค่าอัตราการเกิดสนิม (Corrosion Rate) ของเหล็กในคอนกรีต โดยวิธีการของความถี่ที่เหมาะสมด้วยหลักการ Superimpose Current Pulse โดยจำลองสภาพคอนกรีตเสริมเหล็กให้อยู่ในสภาวะสิ่งแวดล้อมทะเลด้วยการใช้น้ำทะเลสังเคราะห์แทนน้ำทะเลจริงและเร่งการเกิดสนิมด้วยวิธีการทางไฟฟ้าซึ่งพฤติกรรมอาจจะแตกต่างจากสภาพจริงเนื่องจากความจำกัดในด้านระยะเวลาซึ่งต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบอื่นที่มีผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต เช่น หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ความสามารถในการเทได้ กำลังรับแรงอัด ความทนทานต่อการซึมผ่านของคลอไรด์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ปัจจุบันการวัดค่าการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีตเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายให้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำ แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถทำการวัดจากโครงสร้างจริงได้ แต่ในวิธีการที่มีรูปที่แบบโดยใช้สนามไฟฟ้าสามารถทำได้ แต่ความถูกต้องแม่นยำขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมหลายสิ่ง ดังนั้นการพัฒนาวิธีการและเครื่องมือให้มีความถูกต้องแม่นยำสูงจะเป็นองค์ความรู้ใหม่ต่อไป ซึ่งในอนาคตสิ่งปลูกสร้างที่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะเกิดการเสื่อมสภาพมากขึ้น ดังนั้นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการเกิดสนิมจะเป็นสิ่งที่บอกถึงอายุการใช้งานของโครงสร้างที่เหลือนอยู่ หากเครื่องมือวัดมีประสิทธิภาพของการวัดค่าที่มีความละเอียดสูงก็สามารถที่จะทำนายอายุการใช้งานที่เหลือนอยู่ของโครงสร้างได้ถูกต้องจึงมีส่วนช่วยสำคัญในด้านความปลอดภัยเป็นอย่างมาก และยังเป็นการศึกษาข้อมูลอย่างเป็นระบบอีกส่วนหนึ่ง

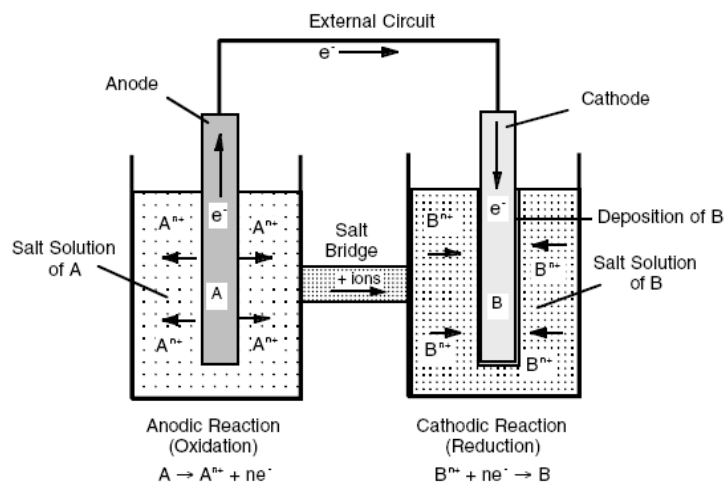
เครื่องมือวัดการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีต ในประเทศไทย ยังมีการใช้ไม่เป็นที่แพร่หลาย เนื่องจากต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาแพงมาก ทั้งที่คนไทยก็มีความสามารถที่จะจัดทำเครื่องมือนี้ขึ้นมาได้หากแต่ยังมีปัจจัยในด้านต้นทุนในการวิจัยค้นคว้าหากมีหน่วยงานที่สนับสนุนให้ทุนวิจัยคนไทยก็สามารถทำได้ซึ่งเป็นการส่งเสริมให้มีเทคโนโลยีเทียบเท่ากับในต่างประเทศ ปัญหาของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยก็จะเหมือนกันกับทุกประเทศทั่วโลก และยังมีแนวโน้มที่จะใช้คอนกรีตเสริมเหล็กเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในปัจจุบัน ซึ่งจะต้องมีการตรวจสอบวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีตให้มีอายุการใช้งานได้นานขึ้นด้วยโครงการวิจัยนี้ จะมีความสอดคล้องกับการผลิตในเชิงพาณิชย์ต่อไป

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

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

2.1 การประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต

สำหรับเนื้อหาวิทยานวิจัยส่วนนี้ประกอบไปด้วยกลไกการเกิดสนิมและหลักการที่ใช้ในการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

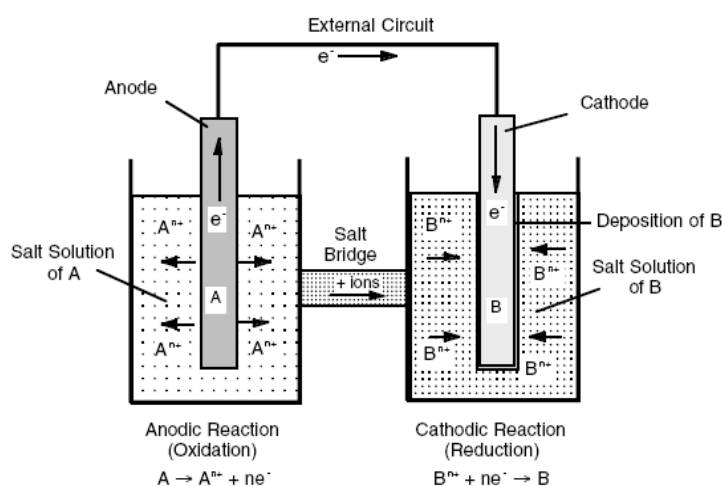


รูปที่ 2-1 ผลการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยม

2.2 ทฤษฎีการเกิดสนิม

ขบวนการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของเซลล์ (Electrolytic Cell) ในการเกิดสนิมเป็นขบวนการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้า-เคมี ที่มีความยุ่งยากซับซ้อนเนื่องจากเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตมีการสูญเสียอิเล็กตรอนซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าทั้งระบบของคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในระบบของการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันซึ่งจะต้องมีความเข้าใจถึงกลไกของการกัดกร่อนสามารถอธิบายได้จากขบวนการของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ เซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) และเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic Cell) โดยที่เซลล์ไฟฟ้าเคมีเมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ในขณะที่เซลล์อิเล็กโทรไลต์เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ต้องผ่านกระแสไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไปจึงจะเกิดปฏิกิริยาเคมี และจากรูปที่ 1 แสดงแผนภูมิการเกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในเซลล์กัลวานิก โดยที่โลหะที่เกิดการกัดกร่อนเป็นขบวนการที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (การรับและเสียอิเล็กตรอน) เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านสื่อตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกและการเคลื่อนที่ของไอออนที่อยู่ภายในโดยมีสารละลายเป็นตัวนำ โดยแนวคิดพื้นฐานนี้เป็นที่นิยมใช้กันและจะต้องเข้าใจถึงกลไกของการกัดกร่อนเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาสื่อตัวนำทางไฟฟ้าในระบบของเซลล์กัลวานิก ในระบบนี้จะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ชนิด เมื่อพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาเคมีโดยที่ขั้ว anode ของโลหะ A จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำหน้าที่เป็นขั้วลบ สูญเสียอิเล็กตรอน (e^-) กลายเป็นไอออน (A^{n+}) อยู่ในสารละลายซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกันเสมอและอิเล็กตรอน (e^-) ที่สูญเสียไปจะเคลื่อนที่ผ่านตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกไปยังขั้ว cathode เป็นขั้วไฟฟ้าที่รับอิเล็กตรอน เรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยารีดักชัน



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

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

การเชื่อมโยงของสารละลาย A และ B โดยสะพานไอออน (Salt bridge) ซึ่งมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ บรรจุอยู่และจะเกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างโลหะทั้งสองที่แช่อยู่ในสารละลายทิศทางการเคลื่อนที่

ของอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Anode) ไปยังขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (cathodes) เมื่อโลหะ A ที่แช่ในสารละลาย A เริ่มสึกกร่อน เนื่องจากโลหะ A สูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นไอออนบวก (An^+) อยู่ในสารละลาย เขียนสมการปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ดังสมการที่ 1 ในขณะที่ขั้วไฟฟ้า cathode มีไอออน (Bn^+) อยู่ในสารละลาย B จะถูกใช้ไปรวมกับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากขั้วไฟฟ้า anode และกลายเป็นอะตอมเกาะติดอยู่ที่โลหะ B จนกระทั่งไอออนบวก (Bn^+) ในสารละลาย B ลดลง 2 สะพานไอออน (Salt bridge) ทำหน้าที่รักษาการสมดุลระหว่างไอออนบวกและไอออนลบในแต่ละครึ่งเซลล์ให้คงที่ เนื่องจากจากโลหะ A สูญเสียอิเล็กตรอนและกลายเป็นไอออน (An^+) ออกมาอยู่ในสารละลาย A ทำให้ไอออน (An^+) ในสารละลายมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ไอออน (Bn^+) ในสารละลาย B ถูกใช้ไปรวมกับอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้า cathode มีค่าเป็นลบและกลายเป็นอะตอมเกาะติดกับโลหะ B ส่งผลทำให้ไอออนบวก (Bn^+) ในสารละลาย B ลดลงและเหลือไอออนบวก (Bn^+) น้อยกว่าที่มีอยู่ในสารละลาย B ผลก็คือทำให้ประจุสุทธิในสารละลาย B เป็นลบหรือมีค่าเป็นบวกลดลง ดังนั้นเพื่อให้เกิดการสมดุล สารละลายโพตัสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่อยู่ในสะพานไอออน (Salt bridge) จะเกิดการแตกตัวจะส่งให้ไอออนลบ (Cl^-) ลงไปในสารละลาย A ซึ่งเป็นด้านที่มีไอออนบวกเพิ่มขึ้นในขณะเดียวกันไอออนบวก (Bn^+) ในสารละลาย B ถูกใช้ไปจนทำให้ไอออนบวกลดลง สะพานไอออนก็จะทำหน้าที่ส่งไอออนบวก (k^+) ลงมาในสารละลาย B ทำให้มีปริมาณไอออนบวกในสารละลาย A และ B สมดุลกันผลก็คือปริมาณไอออนสุทธิในสารละลายทั้งสองจะคงที่ พิจารณาได้จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้สามารถแยกออกมาเป็นครึ่งปฏิกิริยาดังนี้

ผลของทั้งสองปฏิกิริยาที่มีไอออนบวกเพิ่มขึ้นในสารละลาย A ที่ขั้วไฟฟ้า anode ในขณะที่ไอออนบวกถูกใช้หมดไปในสารละลาย B ที่ขั้วไฟฟ้า Cathode ปฏิกิริยาครึ่งเซลล์ยังคงทำหน้าที่เชื่อมต่ออยู่ระหว่างสองสารละลายเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร แต่ถ้าสื่อที่เป็นตัวนำไม่สามารถเชื่อมต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าก็จะไม่เกิดการกัดกร่อนขึ้นที่ขั้ว Cathode และก็จะไม่มีอะตอม

2.3 การวัดแบบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากปฏิกิริยาไฟฟ้าในลักษณะศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (half-cell Potentials) ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไม่สามารถที่จะวัดค่าได้ด้วยขั้วไฟฟ้าเดี่ยว ดังนั้นหากนำเอาครึ่งเซลล์ต่างชนิดมาต่อกันให้เป็นวงจรผลของศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของครึ่งเซลล์ที่นำมาต่อกันซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กัลวานิกมีหน่วยในการวัดค่าเป็นโวลต์ ทั้งนี้หากนำศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไฮโดรเจนมาตรฐานไปเปรียบเทียบกับครึ่งเซลล์ชนิดใดชนิดหนึ่งโดยนำไปต่อเป็นเซลล์ไฟฟ้าคู่กับครึ่งเซลล์ไฮโดรเจนมาตรฐานค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่วัดได้จะเป็นศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานครึ่งเซลล์นั้น ศักย์ไฟฟ้าเหล่านี้มีผลต่อการกัดกร่อนที่ขั้วไฟฟ้า anode เมื่อมีกระแสไฟฟ้าจากภายนอกครบวงจร โดยปรกติศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จะแสดงในรูปที่ของปฏิกิริยา Oxidation ซึ่งเกิดจากอะตอมของโลหะเกิดการแตกตัวปล่อยอิเล็กตรอนและไอออนบวกออกมาพร้อมกันโดยที่ผลกระทบของค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนบวก



ในสารละลายที่มีขั้วไฟฟ้าแช่อยู่และอุณหภูมิของสารละลาย ดังนั้นค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานเป็น การวัดความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิมาตรฐาน และสำหรับค่าที่วัดได้จะมีค่าที่เป็นลบมากกว่าซึ่งจะ ชี้ให้เห็นถึงแนวโน้มของโลหะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนและส่งผลต่อการกัดกร่อนของโลหะ

สมมติให้วงจรไฟฟ้าภายนอกจาก แทนด้วยโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานไฟฟ้าที่มีความละเอียดสูง ซึ่งไม่มีกระแสไฟฟ้าจากภายนอกผ่านเข้ามาในวงจรเป็นเงื่อนไขของสถานะที่เรียกว่า (Open-circuit Potential) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์เป็นค่าของศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วไฟฟ้าที่มีความแตกต่างกันระหว่างปฏิกิริยา anodic และปฏิกิริยา Cathodic (Brown,T.L.and LeMay,H.E.,Jr.,1988)

จากตัวอย่างลักษณะนี้ตาม ถ้าสมมติให้ขั้วไฟฟ้าอันหนึ่งเป็นเหล็กแช่ในสารละลายที่มีไอออนของ เหล็กและอีกขั้วไฟฟ้าเป็นสังกะสีแช่ในสารละลายซึ่งมีซิงค์ไอออนละลายอยู่จะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ มาตรฐานสำหรับปฏิกิริยา Oxidation ของเหล็กอ่านได้ -0.44 โวลต์ และค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ มาตรฐาน สำหรับปฏิกิริยา Oxidation ของสังกะสีอ่านได้ -0.76 โวลต์ (Fontana, M.G., 1986) ศักย์ไฟฟ้าของสังกะสี จะมีค่าเป็นลบมากกว่าเหล็ก เพราะว่าแนวโน้มการสูญเสียอิเล็กตรอนของสังกะสีมีมากกว่าเหล็ก และถ้า ปลายต้านบวกของโวลต์มิเตอร์มีการเชื่อมต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าสังกะสี ค่าของศักย์ไฟฟ้าอ่านได้ -0.32 โวลต์ และถ้าปลายต้านบวกของโวลต์มิเตอร์เชื่อมต่อเข้ากับขั้ว cathode ค่าศักย์ไฟฟ้าอ่านได้ $+0.32$ โวลต์ ดังนั้น ขั้วไฟฟ้าสังกะสีจะเป็นขั้ว anode และขั้วไฟฟ้าของเหล็กจะเป็นขั้ว cathode แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนของ อิเล็กตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าสังกะสี (anode) ผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกไป ยังขั้วไฟฟ้าของเหล็ก (cathode) ซึ่งสวนทางกับการไหลของกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ ดังนั้น สังกะสีจึงเป็นขั้วลบและเหล็กเป็นขั้วบวกหรือกล่าวได้ว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าไปยัง ขั้วศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าสรุปได้ว่าครึ่งเซลล์ที่รับอิเล็กตรอน (cathode) มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าครึ่งเซลล์ที่ให้ อิเล็กตรอน (anode)

2.4 หลักการตรวจวัดโดยใช้การตรวจจับด้วยหลักการคลื่นสัญญาณ

2.4.1 หลักการของความถี่คลื่นสัญญาณทางไฟฟ้า

ความสำคัญของการวัดตรวจสอบสภาพพื้นผิวเหล็กเสริมในคอนกรีตแบบไม่ทำลายมีมากขึ้น ตามลำดับ เนื่องมาจากหลากหลายสาเหตุแต่สาเหตุหนึ่งคือการได้ผลของการกัดกร่อนที่แม่นยำเมื่อนำไปใช้ งานและด้วยเหตุที่สัญญาณทางไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของไฟฟ้า ที่จ่ายให้กับเหล็กเสริมที่อยู่ใน คอนกรีตเกิดภาวะการเหนี่ยวนำที่ต่างกัน จึงทำให้สามารถนำมาตรวจสอบความเป็นสนิมของเหล็กเสริมใน คอนกรีตได้ ผลของค่าความเหนี่ยวนำจะมีผลหรือสามารถวิเคราะห์หาอัตราการกัดกร่อนโดยผลของปริมาณ สัญญาณความถี่ที่เหนี่ยวนำจะถูกควบคุมสภาพแวดล้อมและย่านความถี่ที่มีผลต่อการเกิดสนิมเพื่อวิเคราะห์ สัญญาณ ความสัมพันธ์ของการกัดกร่อนเพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพการของการวัดค่า ที่เหมาะสมกับ



ตัวอย่างเช่น การเลือกความถี่ของคลื่นสัญญาณให้เหมาะสมกับขนาดพื้นที่ที่ทำการวัดเป็นต้น เนื่องจากการวัดแบบใช้ความถี่คลื่นสัญญาณทางไฟฟ้าจะต้องกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณแล้ว เพื่อให้ได้ค่าการกัดกร่อนที่ถูกต้องมากที่สุด ในการปรับแต่งปริมาณของการให้กำลังงานทางไฟฟ้าก็เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการวัด เนื่องจากค่าคุณสมบัติของเหล็กเสริมแต่ละประเภทผิว จะมีค่าเบี่ยงเบนความต้านทานจำเพาะที่ไม่เท่ากัน

ดังนั้นการออกแบบขั้นตอนการวิจัยเครื่องมือวัดจึงต้องคำนึงหลายปัจจัย และทำการให้น้ำหนักอย่างเหมาะสมถูกต้องอีกด้วย เครื่องมือวัดจะมีค่าการคำนวณคุณสมบัติอยู่หลายแบบ ให้ผู้ใช้ได้เลือกวิธีการคำนวณเพื่อหาคุณสมบัติหรือวิเคราะห์หาค่าตามที่ต้องการ การทำงานของเครื่องวัด/วิเคราะห์ จะเป็นการทำงานร่วมกันของหัวอ่าน (Transducer Probe) กับชุดขยายสัญญาณและควบคุม (Amplifier) ที่จะแปลงผลการสัมผัสของปลายวัด ซึ่งเคลื่อนที่ขึ้นลงตามลักษณะของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการใช้การปรับเปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้ารวมที่มีคลื่นของความถี่สูงและต่ำผสมกันอยู่ อันมีผลมาจากลักษณะโครงสร้างรวมของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการวัดได้ ซึ่งการประมวลผลของการกัดกร่อน จะขึ้นตามคุณสมบัติการวัด จำเป็นต้องแยกลักษณะสัญญาณความถี่สูงและต่ำนี้ออกจากกัน เนื่องจากแต่ละลักษณะเป็นค่าที่แทนคุณสมบัติที่ต่างกัน คือ ย่านความถี่สูงจะเป็นค่าคุณสมบัติของความหยาบ (Roughness) ผิวเหล็กที่เกิดการกัดกร่อนและ ย่านความถี่ต่ำจะเป็นค่าคุณสมบัติของความเป็นคลื่น (Waviness) เพื่อการจำแนกคุณสมบัติของสองความถี่นี้ออกจากกันจึงกำหนดใช้การกรองสัญญาณ (Cutoff Filter) เป็นจุดแยกกันของสัญญาณที่เป็นคุณลักษณะแทนของคุณสมบัติสองแบบ ความแตกต่างนี้กำหนดโดยการผ่านค่าที่กำหนดของสัญญาณ หากเป็นสัญญาณผ่านย่านความถี่สูง (High Pass) จะเป็นลักษณะของความหยาบของการเกิดสนิม (Corrosion Roughness) และสัญญาณผ่านย่านความถี่ต่ำ (Low Pass) จะเป็นลักษณะของความเป็นคลื่น (Waviness)

2.4.2 การออกแบบวงจรการวัดค่า

การวัดค่าการเกิดสนิมโดยใช้หลักการความถี่ไฟฟ้าด้วยคลื่น ซึ่งนำหลักการของ อินเวอร์เตอร์ความถี่สูงทำงานร่วมกับหม้อแปลงแรงดันความถี่สูง และวงจรที่เกี่ยวข้องอื่นๆ มาใช้ประโยชน์สำหรับการแปลงอินพุต ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำขนาด 220Vrms, 50Hz ให้เป็น เอาท์พุตไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงที่สามารถปรับแต่งค่าความถี่ได้ ขนาดแรงดันที่สามารถเลือกได้ ย่านความถี่ที่เหมาะสมคือประมาณ 0-1000 kHz เพื่อจ่ายให้กับ ตัวแปลงสัญญาณในงานนี้ชุดของทรานซิสเตอร์ และหัววัดถูกนำมาติดตั้งเพื่อส่งความถี่และพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าเข้าสู่เหล็กที่อยู่ในคอนกรีต อุปกรณ์ที่จะประกอบขึ้นเพื่อส่งคลื่นความถี่ไฟฟ้าที่เหมาะสมและสมบูรณ์ ที่นำเสนอ



2.5 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าและพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นหลักการเบื้องต้นเพื่อความเข้าใจในหลักการการทำงานของเครื่องตรวจ วัดค่าความเป็นสนิมของเหล็กในคอนกรีต การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าคือการเปลี่ยนแปลงในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าที่อยู่ในสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์

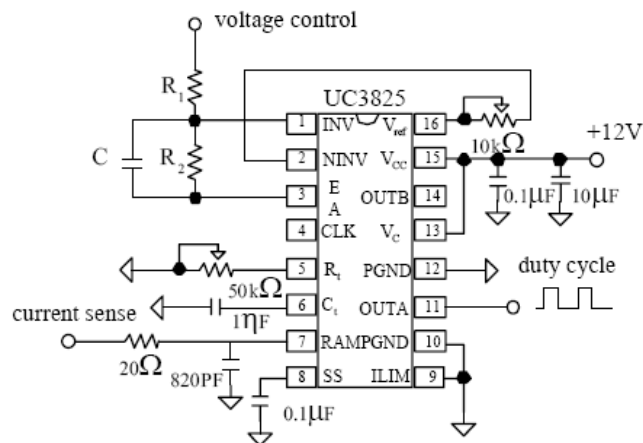
โครงสร้างโดยรวมของเครื่องวัดการกัดกร่อนสนิมเหล็กในคอนกรีตโดยใช้ คลื่นซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ ส่วนวงจรเรกติไฟร์ ส่วนวงจรดีซี-ลิงค์, ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์, ส่วนวงจรกำเนิด สัญญาณพัลส์, ส่วนวงจรขับเกท และส่วนของตัวกำเนิดคลื่นความถี่ไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดแสดง ดังด้านล่าง

วงจรเรียงกระแส (Rectifier circuit)

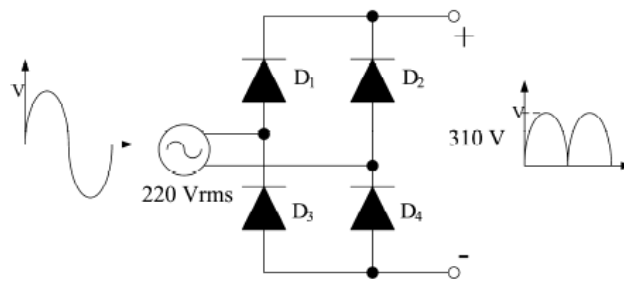
ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 220 Vrms, 50Hz ให้ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 310 V เพื่อเป็นแรงดันขาเข้าให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ ซึ่งในวงจรส่วนนี้ได้ใช้ไดโอดบริดจ์แบบวงจรเรียงกระแสไฟตรงดังภาพที่ 13ก

วงจรส่วนกำเนิดสัญญาณพัลส์ (Pulse generator)

วงจรในส่วนนี้จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์เพื่อควบคุมการทำงานของ มอสเฟตกำลังทั้ง 4 ตัวในวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งใช้ ไอซีเบอร์ UC 3825 ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ซึ่งสามารถปรับ ความถี่และปรับค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle)



รูปที่ 2-3 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์



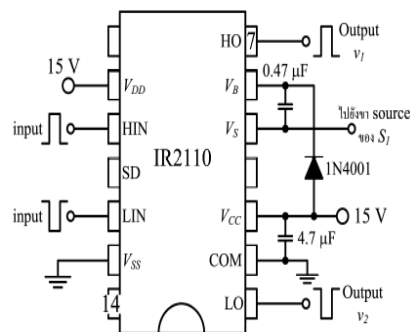
รูปที่ 2-4 วงจรเรียงกระแสไฟตรง

วงจรเชื่อมต่อทางแสง (Optocoupler)

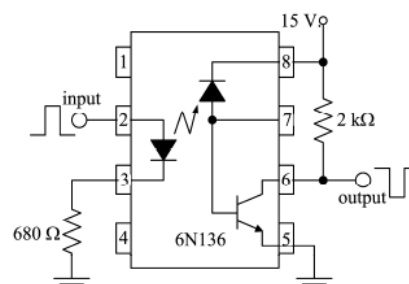
ทำหน้าที่แยกกราวนระหว่างวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ และวงจรขับเคลื่อนเพื่อป้องกันความเสียหายที่วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์โดยใช้ไอซีเบอร์ 6N136 ซึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทน pulse transformer ในแบบเดิมๆ ที่มีขนาดใหญ่

วงจรส่วนขับเคลื่อน (Gate drive)

ทำหน้าที่ขยายสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ให้มีขนาดสูงขึ้น พร้อมทั้งทำหน้าที่แยกกราวนระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์กับวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ เพื่อป้องกันการลัดวงจรเข้าสู่วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์



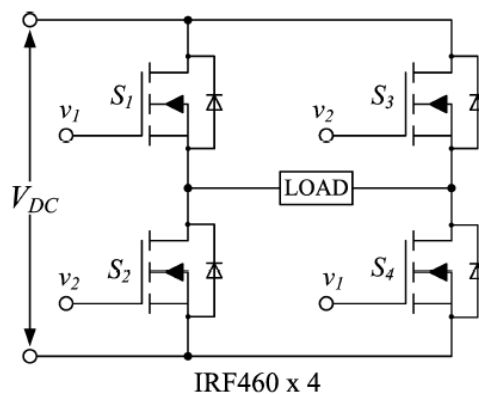
รูปที่ 2-5 ตัวอย่างวงจรการขับเคลื่อน



รูปที่ 2-6 วงจรเชื่อมต่อทางแสง

2.6 วงจรอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (High frequency inverter)

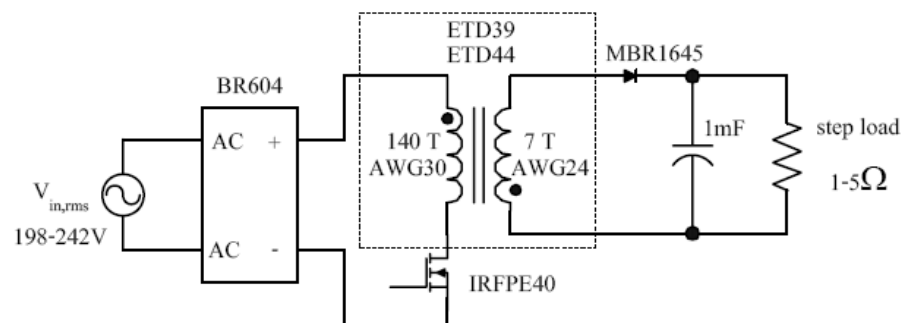
ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งประกอบด้วย มอสเฟตกำลัง 4 ตัว ต่อในลักษณะวงจร อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบฟูลบริดจ์ การทำงานของมอสเฟตกำลัง ทั้ง 4 ตัว จะได้รับสัญญาณขับเกตจากวงจรภาคขับเกต เพื่อให้ มอสเฟต กำลังทำงานเป็นสวิตช์ (ON/OFF) เพื่อทำการตัดต่อ ไฟฟ้ากระแส ตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ เพื่อส่งไปให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงต่อไปแสดง วงจรดังภาพที่ 15



รูปที่ 2-7 วงจรอินเวอร์เตอร์

หม้อแปลงความถี่สูง (High frequency transformer)

ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันที่มีความถี่สูงที่ออกจากวงจรอินเวอร์เตอร์ ทรานสดิวเซอร์ที่ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณไฟฟ้า สามารถเปลี่ยนแปลงระดับได้จาก ดังนั้นหม้อแปลงความถี่จะทำการลดระดับ แรงดันที่สร้าง ความถี่โดยมีอัตราส่วนของหม้อแปลงเท่ากับ และเมื่อนำวงจรเรกติไฟร์, วงจรดีซี-ลิงค์, วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์, วงจรขับเกต และวงจรอินเวอร์เตอร์มาประกอบเข้าด้วยกัน จะได้เป็นวงจรรวม ทั้งหมดขึ้นมาแสดงวงจร ดังภาพที่ 16



รูปที่ 2-8 ตัวอย่างหม้อแปลงที่ใช้ความถี่สูงกว่า

หม้อแปลงความถี่สูงนี้จะมีขดลวด 2 ชุดพันซ้อนกันอยู่โดยใช้อากาศเป็นแกนจึงทำให้ค่า mutual inductance มีค่าต่ำ ขดลวด L_1 จะต่อขนานกับ C_1 ผ่าน spark gap ชนิด quenching gap และ L_2 จะต่อขนานกับ C_2 ซึ่งเป็น capacitance ของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบการทำงานกรณีเป็นความถี่ปกติคือกรณี no load จะมีความถี่เป็นความถี่ธรรมชาติ (natural frequency)

$$f_i = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$$

$$f_{i1} = \frac{f_i}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1-k}} + \frac{1}{\sqrt{1+k}} \right]$$

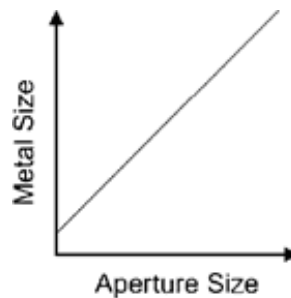
$$k = \frac{M^2}{L_1 L_2}$$

ทำนองเดียวกันกระแส Oscillation ด้านแรงต่ำจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นทางด้านแรงสูง ซึ่งมีความถี่ธรรมชาติดังสมการที่ 17 ถ้าทำการปรับค่า $L_2 C_2 = L_1 C_1$ จะทำให้ความถี่ทั้ง 2 ด้านมีค่าเท่ากัน

$$f_{i2} = f_i = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$$

เนื่องจากค่า k มีค่าต่ำสุดจึงทำให้ Induce Voltage ทางด้าน load ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งการ spark ลื่นสุดลง ซึ่งจะได้ความถี่ใช้งานในช่วง 0 – 1000 kHz

การตรวจจับด้วยหลักการคลื่นสัญญาณที่ส่งผลต่อระดับความไวของเครื่องตรวจจับโลหะ ทำให้การปรับค่าระดับความไวที่เหมาะสมต่อการทำงานต้องมีความสอดคล้องกับสภาพการทำงานจริงซึ่งเรียกค่าระดับความไวที่เหมาะสมต่อการทำงานจริง



รูปที่ 2-9 กราฟแสดง Practical sensitivity

การเพิ่มขนาดของช่วงความถี่ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการตรวจหาโลหะขนาดเล็กสุดที่ตรวจวัดได้มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยนอกจากนี้ หากพิจารณา ตำแหน่งที่ขึ้นโลหะเคลื่อนผ่านในช่วงความถี่จะมีผลต่อระดับความแรงของสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่เครื่องตรวจจับโลหะสามารถตรวจวัดได้แตกต่างกันดังรูปที่ พบว่าโลหะที่เคลื่อนผ่านจุดกึ่งกลางของช่วงความถี่จะส่งค่าความแรงของสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำสุด ในขณะที่การเคลื่อนที่ของโลหะที่ผ่านบริเวณขอบด้านในช่วงความถี่จะให้ระดับความแรงของสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุด

2.7 การแบ่งประเภทของกลุ่มเหล็กที่ใช้ในงานคอนกรีต

กลุ่มโลหะแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กและคุณสมบัติด้านตัวนำที่แตกต่างกัน การใช้เครื่องตรวจวัดโลหะตรวจหาความแตกต่างจากสัญญาณทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถนำมากำหนดกลุ่มประเภทของโลหะ โดยระดับความไวที่เครื่องตรวจจับโลหะสามารถตรวจจับได้หรือเรียกว่าค่า Sensitivity จะสามารถนำมากำหนดกลุ่มของโลหะจากระดับที่ตรวจจับได้ง่ายที่สุด หรือให้ค่าความแรงของสัญญาณทางไฟฟ้าที่สูง จนถึงการตรวจจับได้ยากสุด



รูปที่ 2-10 ชนิดโลหะ

Ferrous: Fe

โลหะกลุ่มที่มีธาตุเหล็ก ซึ่งมีปฏิกิริยาต่อแม่เหล็ก(แม่เหล็กดูดติดได้) เช่น เหล็ก เป็นกลุ่มที่สามารถตรวจจับได้ง่ายที่สุดในประเภทของโลหะทุกกลุ่มที่ปนเปื้อน

Non-Ferrous

โลหะกลุ่มที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้า แต่ไม่มีปฏิกิริยาต่อแม่เหล็ก เช่น ทองแดง อลูมิเนียม ทองเหลือง เป็นต้นหากทำการตรวจผลิตภัณฑ์ประเภท Dry products ลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้นจะเหมือนกับโลหะประเภท ferrous สามารถตรวจหาโลหะกลุ่มนี้ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารตัวนำที่ดี หากทำการตรวจผลิตภัณฑ์ประเภทกลุ่ม Wet products จะส่งผลให้การความสามารถของตรวจสอบมีอัตราการตรวจพบโลหะลดลงอย่างน้อย 50% ทำให้ตรวจพบได้ยากขึ้น

Non-Magnetic Stainless Steel:

โลหะกลุ่มสแตนเลสที่มีคุณภาพสูง เช่น Type 304, 316 จัดเป็นกลุ่มที่ตรวจจับได้ยากสุด เนื่องจากโลหะกลุ่มนี้จัดเป็นกลุ่มที่มีคุณสมบัติของตัวนำทางไฟฟ้า (electrical conductive qualities) ที่ต่ำมาก และยังมีสมบัติทางแม่เหล็กที่ต่ำด้วย หากทำการตรวจผลิตภัณฑ์ประเภทกลุ่ม Dry products พบว่าความสามารถในการตรวจหาโลหะกลุ่ม Non-Magnetic Stainless Steel จะตรวจหาได้ยากกว่า เนื่องจากค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้จากการใช้โลหะทรงกลมที่ทำจากโลหะกลุ่มนี้ต้องทำให้มีของโลหะทรงกลมขนาดใหญ่กว่าโลหะกลุ่ม ferrous ถึง 50% แต่กลับให้ค่าความแรงของสัญญาณไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกันกับสัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดจากโลหะทรงกลม ferrous และหากทำการตรวจสอบหาโลหะกลุ่มนี้ในกลุ่ม Wet products แล้วนั้นต้องใช้โลหะสแตนเลสทรงกลมขนาดใหญ่ขึ้นถึง 200-300 % เพื่อนำมาทดสอบโดยเปรียบเทียบกับโลหะ

ทรงกลมกลุ่ม ferrous จึงจะส่งสัญญาณให้เครื่องตรวจจับโลหะตรวจจับสัญญาณการมีอยู่ของโลหะกลุ่ม Non-Magnetic Stainless Steel นี้ได้

รูปที่ทรงและรูปที่แบบการจัดเรียงตัวของโลหะ

การทดสอบเครื่องตรวจจับโลหะโดยปกติจะใช้โลหะที่มีรูปทรงกลมในการทดสอบเครื่องตรวจจับโลหะเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากการเรียงตัวของรูปที่ทรงโลหะในกรณีที่ขึ้นโลหะมีหลายเหลี่ยมมุมแต่สำหรับการตรวจสอบในสถานการณ์จริงกับพบว่าการมีอยู่ของโลหะจะมีรูปที่ทรงแตกต่างกัน และเมื่อประเมินผลของการให้สัญญาณทางไฟฟ้าเมื่อนำขึ้นโลหะที่ไม่ใช่รูปทรงกลมมาผ่านเครื่องตรวจจับโลหะจะให้สัญญาณทางไฟฟ้าที่ต่างกันตามลักษณะและรูปที่ทรงของโลหะที่เคลื่อนผ่านจากผลของรูปที่ทรงโลหะที่ต่างกันนี้ หากนำมาเปรียบเทียบรูปที่ทรงของเส้นลวดโลหะและนำมาผ่านเครื่องตรวจจับโลหะตามแนวยาว และแนวขวางของเส้นลวดโลหะ จะพบว่า

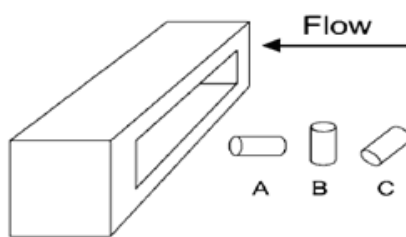


Figure 9

รูปที่ 2-11 กลุ่มโลหะ

เส้นลวดกลุ่ม Ferrous Wires

รูปที่แบบ A เป็นรูปที่แบบตำแหน่งของโลหะที่เครื่องสามารถตรวจพบขึ้นโลหะกลุ่ม Ferrous Wires นี้ได้ดีและตรวจสอบได้ง่ายให้ค่าความแรงของสัญญาณสูง

รูปที่แบบ B C เป็นการจัดเรียงของโลหะในรูปที่แบบการเรียงตัวของโลหะที่ตรวจพบสัญญาณได้ไม่ดีและให้ค่าความแรงของสัญญาณต่ำ ส่งผลให้ตรวจพบได้ยากกว่า

เส้นลวดกลุ่ม Non-Ferrous และ Stainless Steel Wires

รูปที่แบบ B C เป็นรูปที่แบบตำแหน่งของโลหะที่เครื่องสามารถตรวจพบขึ้นโลหะกลุ่มนี้ได้ดีและตรวจสอบได้ง่ายให้ค่าความแรงของสัญญาณไฟฟ้าสูงรูปที่แบบ A เป็นการจัดเรียงของโลหะในรูปที่แบบที่ได้ไม่ดี และให้ค่าความแรงของสัญญาณไฟฟ้าต่ำ ส่งผลให้ตรวจพบโลหะได้ยากกว่า

2.8 การสร้างความถี่เพื่อการทดสอบ

ชิพแบบ XT เป็นออสซิลเลเตอร์คริสตอลแบบมาตรฐาน ซึ่งอาจต้องการคริสตอลแบบสตริปคัต AT (AT strip-cut) เพื่อหลีกเลี่ยงการโอเวอร์ไดรฟ์ (overdrive) ส่วนชิพแบบ HS เป็นออสซิลเลเตอร์คริสตอล

ชนิดความเร็วสูง ซึ่งอาจจะต้องใช้ตัวต้านทานต่อเชื่อมด้วยในกรณีที่ต้องการให้เกิดความถี่ออสซิลเลชัน ที่น้อยกว่า 20 MHz การเลือกตัวเก็บประจุสำหรับออสซิลเลเตอร์ชนิดคริสตอล สามารถพิจารณาได้ดังตาราง

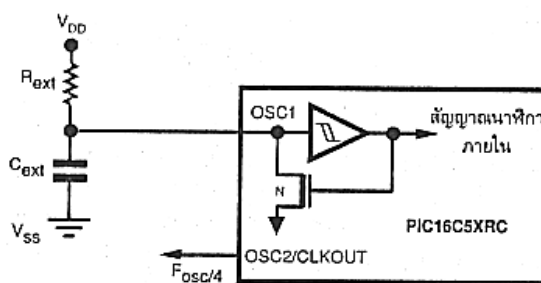
ออสซิลเลเตอร์	ความถี่	C1	C2
LP	32 kHz	15 pF	15 pF
XT	100 kHz	15-30 pF	200-300 pF
	200 kHz	15-30 pF	100-200 pF
	455 kHz	15-30 pF	15-100 pF
	1 MHz	15-30 pF	15-30 pF
HS	2 MHz	15 pF	15 pF
	4 MHz	15 pF	15 pF
	4 MHz	15 pF	15 pF
	8 MHz	15 pF	15 pF
	20 MHz	15 pF	15 pF
	20 MHz	15 pF	15 pF

รูปที่ 2-12 ชิพแบบ XT เป็นออสซิลเลเตอร์คริสตอลแบบมาตรฐาน

ออสซิลเลเตอร์แบบ RC

เหมาะกับ งานที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงมากนัก อีกทั้งราคาก็ถูกกว่าแบบอื่น โดยความถี่จากวงจรออสซิลเลเตอร์แบบ RC จะขึ้นอยู่กับ

- ความต้านไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟ
- ตัวต้านทาน (R_{ext})
- ค่าตัวเก็บประจุ (C_{ext})
- อุณหภูมิที่ใช้งาน
- อุปกรณ์ต่างๆ
- ความกว้างของขอบตั่วระหว่างไอซีของตัวเก็บประจุชนิดนั้นๆ



รูปที่ 2-13 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ RC เข้ากับ PIC สำหรับค่า R_{ext} ที่น้อยกว่า 2.2 กิโลโอห์ม

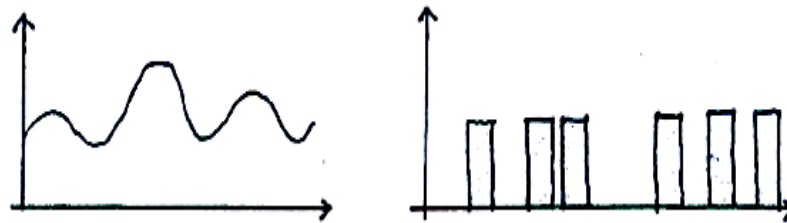
วงจรรวมหรือไอซี (Integrated Circuit, IC)

วงจรรวมหรือไอซี (Integrated Circuit, IC) เป็นวงจรรวมอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งรวบรวมอุปกรณ์ต่าง ๆ อย่างเช่น ทรานซิสเตอร์ ไดโอด ตัวต้านทาน ลงบนชิพ (chip) เล็ก ๆ ของซิลิกอนซึ่งอุปกรณ์ทั้งหลายเหล่านี้จะต่อถึงกันด้วยลวดอลูมิเนียม (บางครั้งเป็นทองคำ) โดยในไอซีนี้อาจประกอบด้วยอุปกรณ์เพียงไม่กี่ชิ้นจนถึงหลายร้อยหลายพันชิ้น ไอซีเหล่านี้ได้ถูกสร้างเป็นของเล่นของใช้ เช่น วีดีโอเกม นาฬิกาดิจิตอล ตลอดจนชิ้นส่วนของเครื่องคอมพิวเตอร์ และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่มีความซับซ้อน

ชนิดของไอซี วงจรรวมไอซีจัดเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 2 กลุ่มคือ

Analog IC หรือ Linear IC

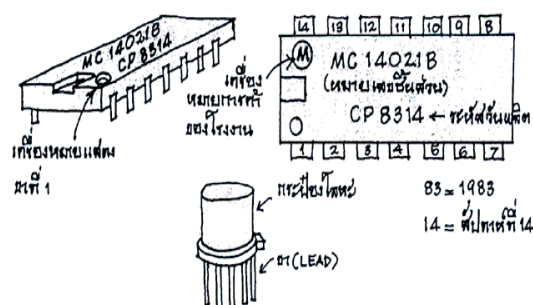
ดิจิตอลไอซี (Digital IC) หรือ Logic IC เป็นไอซีที่ตอบสนองหรือกำหนดระดับสัญญาณเพียงแค่ 2 ระดับ คือระดับลอจิกสูง และระดับลอจิกต่ำ ไอซีพวกนี้เป็นจำพวกไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor) หน่วยความจำ (Memory) ซึ่งมีใช้ในไมโครโปรเซสเซอร์ และอื่น ๆ



รูปที่ 2-14 แสดงกราฟ Analog IC และ ดิจิตอลไอซี

ผังและการดูขาไอซี

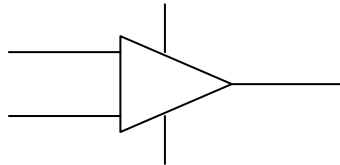
ไอซีส่วนใหญ่จะมีตัวถังเป็นแบบขาคว่ำขนาน (Dual IN-line package: DIP) นอกจากนี้อาจมีตัวถังประเภทอื่น ๆ เช่น ตัวถังโลหะเป็นหมวกปีก (TO-5) เป็นต้น ไอซีส่วนใหญ่จะมีหลายขา เช่น 14 ขาหรือมากกว่า แต่ก็ยังมีบ้างที่มีเพื่อ 2 ถึง 3 ขา คล้าย ไดโอดหรือทรานซิสเตอร์ วิธีการดูขาไอซี ให้ดูจากรอยบาก ซึ่งจะอยู่ที่มุมของตัวไอซี ให้นำขาที่อยู่ใต้รอยบากเป็นขาที่ 1 และขาถัดมาเป็นขาที่ 2,3 ไปเรื่อย ๆ ตามทิศทางทวนเข็มนาฬิกาดังรูปที่ข้างล่าง



รูปที่ 2-15 แสดงขาใช้งานไดโอดหรือทรานซิสเตอร์

ไอซีออปแอมป์(OP-AMP)

ไอซีออปแอมป์ เป็นอีกรวมวงจรหนึ่งที่ใช้กันกันอย่างแพร่หลายทั้งในรูปแบบของวงจรขยายสัญญาณ วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ โดยต่ออุปกรณ์ภายนอกเพิ่มเติมอีกไม่กี่ชิ้น ก็สามารถทำงานได้แล้ว



V_{in+} = Non-inverting Amplifier

V_{in-} = Inverting Amplifier

+V, -V = แหล่งจ่ายไฟฟ้า

รูปที่ 2-16 สัญลักษณ์ของ OP-AMP

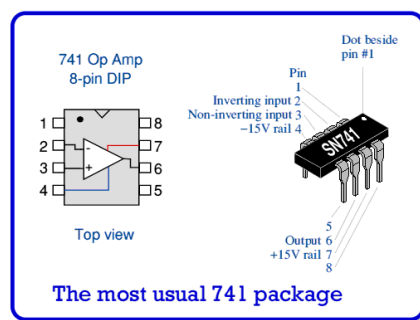
การขยายสัญญาณของ Op-Amp

ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอัตราการขยายและอินพุตแดนซ์อินพุต Z_i หรือ R_i สูงมาก และมีอินพุตแดนซ์เอาต์พุต Z_o หรือ R_o ต่ำมาก

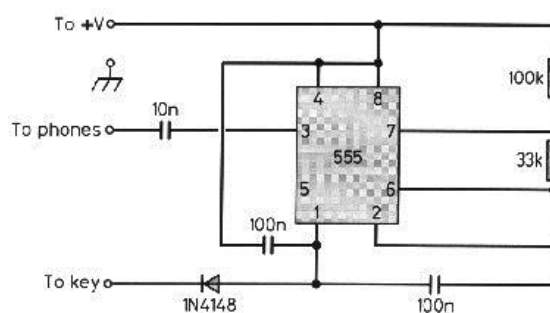
ถ้าจ่ายสัญญาณอินพุตให้กับขั้วบวกของออปแอมป์ จะได้สัญญาณเอาต์พุตมีมุมที่อินเฟสกับสัญญาณอินพุต แต่ถ้าจ่ายสัญญาณอินพุตให้กับขั้วลบของออปแอมป์ จะได้สัญญาณเอาต์พุตมีมุมที่ต่างเฟสกับสัญญาณอินพุต 180 องศา หรือมุมตรงกันข้าม



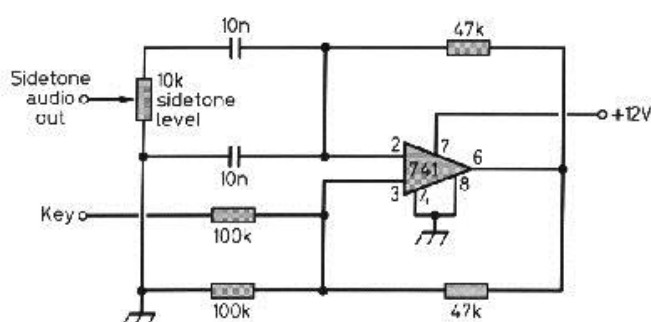
รูปที่ 2-17 แสดงรูปที่แบบจริง Op-AMP



รูปที่ 2-18 การสร้างสัญญาณความถี่ด้วย IC SN741

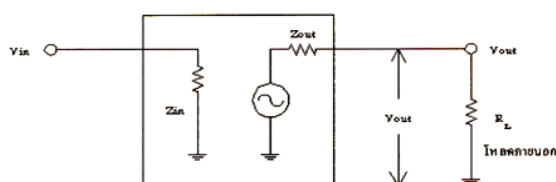


รูปที่ 2-19 การสร้างสัญญาณพิกัดด้วย IC 555



รูปที่ 2-20 การขยายสัญญาณด้วย IC 741

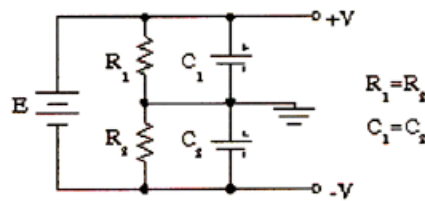
อัตราขยายของ Op-Amp แบบวงจรรอบเปิด (Open Loop Gain) มีค่าสูงมากจนเป็นอนันต์ $AVOL = \infty$
 Z_{in} มีค่าสูงมากจนถือได้ว่าเป็น ∞ Z_{out} มีค่าต่ำมากจนถือได้ว่าเป็น 0 อัตราขยายของ Op-Amp ไม่ขึ้นกับความถี่ เมื่อ $V_{in} = 0$ จะได้ V_{out} เป็น 0 ด้วย จากคุณสมบัติดังกล่าวมาแล้ว มีผลสืบเนื่องคือ $I_{in} = 0$
 เนื่องจาก Z_{in} สูงมาก ความต่างศักย์ระหว่างขั้ว input ทั้งสองของ Op-Amp เป็น 0 เนื่องจาก I_{in} และยังให้ค่า Z_{out} มีค่าต่ำมากจนประมาณได้ว่า $Z_{out} = 0$



รูปที่ 2-21 คุณสมบัติด้านความต้านทางของ Op-Amp

แหล่งจ่ายไฟสำหรับ OP-Amp

ส่วนใหญ่ต้องการแหล่งจ่ายไฟสองชุด บวกและลบ ชนิดสมมาตรอย่างไรก็ตามอาจดัดแปลงแหล่งจ่ายไฟชุดเดียวให้เทียบเท่าแหล่งจ่ายไฟ 2 ชุดได้เช่นกัน

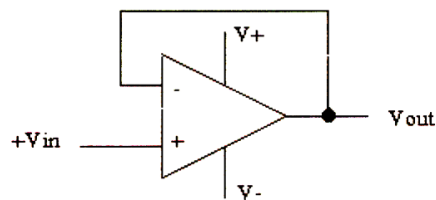


รูปที่ 2-22 การแสดงการเปรียบเทียบการดัดแปลงแหล่งจ่ายไฟชุดเดียวให้เทียบเท่าแหล่งจ่าย 2 ชุด

การขยายสัญญาณความถี่ด้วย OPAMP

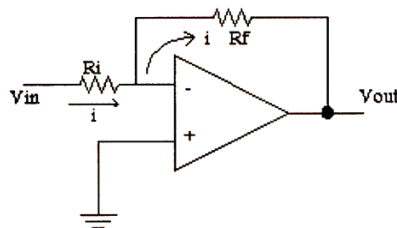
วงจร BUFFER หรือ VOLTAGE FOLLOWER อัตราการขยายวงจรชนิดนี้มี

ค่าประมาณ 1 นั่นคือ $AV = V_{out}/V_{in} = 1$ $V_{out} = V_{in}$



รูปที่ 2-23 วงจรBuffer

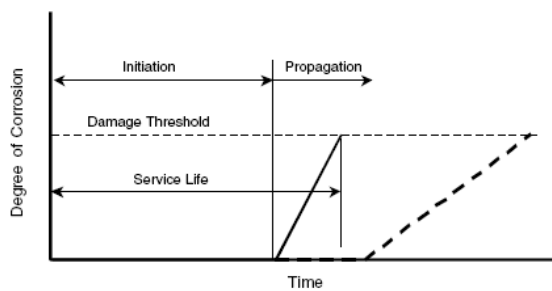
วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverter Amplifier) ความต่างศักย์ระหว่าง V_{in+} และ $V_{in-} = 0$ ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่ขา $V_{in-} = 0$ กระแสผ่าน R_i และ R_f มีค่า i



รูปที่ 2-24 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

2.9 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมเหล็ก

Tutti.,k., 1980 ได้เสนอแนวความคิดโดยการจำลองรูปที่แบบแทนด้วยอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตที่มีความไวต่อการเกิดสนิมของเหล็กและจากรูปที่แสดงให้เห็นถึงระดับของการเกิดสนิมเป็นฟังก์ชันกับเวลาซึ่งในช่วงระยะเวลาเริ่มแรกเหล็กเสริมจะยังไม่เกิดสนิมและถ้าคลอไรด์ไอออนหรือเกิดคาร์บอนเนชั่นที่ผิวหน้าคอนกรีตและซึมผ่านไปจนถึงเหล็กเสริมและเมื่อเหล็กสูญเสียชั้นฟิล์มบางๆที่ป้องกันที่ผิวเหล็กเสริมจะทำให้เกิดสถานะของการแพร่เริ่มต้นขึ้นและระดับของการเกิดสนิมจะพัฒนาเพิ่มขึ้นในอัตราที่รวดเร็ว

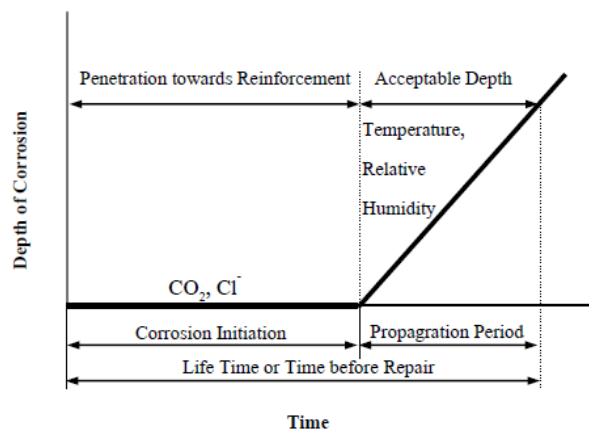


รูปที่ 2-25 รูปที่แบบจำลองกระบวนการเกิดสนิมของเสริมเหล็กในคอนกรีต

ที่มา : (Tutti, K., 1980)

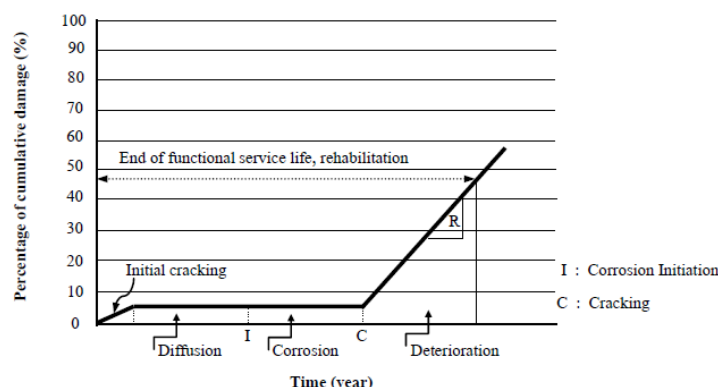
อัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมขึ้นอยู่กับสภาวะของการแพร่ของคลอไรด์ซึ่งเป็นปัจจัยหลักส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยแทนด้วยระยะเวลา เมื่อระดับความเสี่ยงของการเกิดสนิมสูงขึ้นจนมีผลกระทบต่อกำลังของเหล็กเสริมหรือเป็นเหตุให้อายุการใช้งานของโครงสร้างลดต่ำลงจนกระทั่งถึงระดับวิกฤติ ดังนั้นเส้นประ แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า เพราะวาระยะเวลาช่วงเริ่มต้นเป็นช่วงเวลาที่ยาวมากกว่าและอัตราการเกิดสนิมจะลดลงในสภาวะที่มีการแพร่จากรูปที่แบบจำลองอธิบายได้ว่าระยะหุ้มของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีตมีค่าต่ำจะช่วยยืดเวลาอายุการใช้งานยาวนานขึ้น

Tuutti, k. (1982) ได้นำเสนอรูปที่แบบจำลองใช้สำหรับทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตามรูปที่ที่ 8 การเกิดสนิมในระดับสูงสุดที่ยอมรับได้ต้องมีความสัมพันธ์กับรอยแตกกว้างที่ปรากฏให้เห็นซึ่งช่วงเวลาของการเสื่อมสภาพประกอบไปด้วย 2 ช่วงคือช่วงเวลาเริ่มต้นและช่วงเวลาการแพร่โดยที่ความยาวในช่วงเวลาเริ่มต้นเป็นช่วงเวลาโดยประมาณที่ต้องการให้เกิดแทรกซึมของสารละลายเข้าไปถึงผิวของเหล็กเสริมและกระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อน ในขณะที่ช่วงเวลาการแพร่เป็นช่วงเวลาที่สนิมมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นจึงเป็นช่วงเวลาของการซ่อมแซมซึ่งกลายมาเป็นเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการซ่อมแซมและรูปที่แบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของโครงสร้างสะพานคอนกรีตในสภาวะสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดสนิมเป็นรูปที่แบบจำลองการเสื่อมสภาพที่พัฒนาโดย Cady and Weyers (Cady,P.D. and Weyers R.E.,1983) การแทรกซึมของคลอไรด์มีอิทธิพลทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้พื้นผิวสะพานคอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพและแบบจำลองที่ใช้ทำนายการเสื่อมสภาพโดยพิจารณาเป็นเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวทั้งหมดที่เกิดการแตกหลุดลอกแตกออกมาเป็นชั้นๆ และเกิดรอยแตกกว้างหลายแนวนำมารวมกันเป็นความเสียหายทั้งหมดเพื่อใช้ในการทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างที่เหลืออยู่สำหรับใช้งานต่อไป



รูปที่ 2-26 รูปที่แบบจำลองระยะเวลาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ที่มา : Tuutti, K.(1982)

Cady, P.D., and Weyers R.E. (1983) ได้นำเสนอแบบจำลองกระบวนการเสื่อมสภาพโดยคลอไรด์ สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะหุ้มคอนกรีตหนา 2 นิ้ว (50 มม.) รูปที่แบบการจำลองการแบ่งแยกที่ชัดเจนของระยะเวลาการเกิดสนิมมี 3 ระยะได้แก่ ช่วงระยะเวลาที่เกิดการแพร่ (Diffusion Phase) ช่วงระยะเวลาการเกิดสนิม (Corrosion Phase) และช่วงระยะเวลาของการเสื่อมสภาพ (Deterioration Phase) สำหรับช่วงระยะเวลาการแพร่ผ่านถูกกำหนดให้เป็นช่วงเวลาที่คลอไรด์ไอออนแทรกซึมผ่านความหนาของระยะหุ้มของคอนกรีตจนคลอไรด์อยู่ในระดับเพียงพอที่จะทำให้เริ่มเกิดสนิมบนผิวของเหล็กเสริม ซึ่งปกติช่วงเวลาของการแพร่ผ่านสามารถที่จะหาได้จากสูตร Fick's second Law (Crank, J.1956) สำหรับช่วงระยะเวลาที่ 2 เป็นช่วงระยะเวลาเริ่มแรกของการเกิดสนิมจนกระทั่งเริ่มเกิดรอยแตกกร้าวและช่วงระยะเวลาที่ 3 เป็นช่วงระยะเวลาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างในระดับที่เกิดความเสียหายซึ่งในช่วงเวลานี้ต้องทำการซ่อมแซมโครงสร้างให้กลับคืนสู่สภาพปกติ ข้อสังเกตให้พิจารณาอายุแตกกร้าวของระยะหุ้มคอนกรีตที่มีค่าตั้งแต่ 2.5% ของความลึกของระยะหุ้มคอนกรีตทั้งหมด

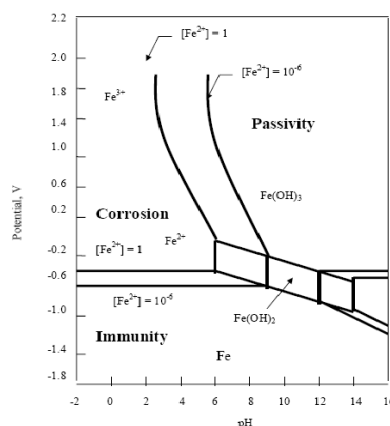


รูปที่ 2-27 แบบจำลองกระบวนการเสื่อมสภาพโดยคลอไรด์สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะหุ้มคอนกรีตหนา 2 นิ้ว (50 มม.) ที่มา : Cady, P.D., and Weyers R.E. (1983)

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 ขนาดของเหล็กเสริม ระยะห่างเหล็กเสริมและอัตราการเกิดสนิมซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการหาช่วงระยะเวลาที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าว (Time to cracking) ของระยะหุ้มคอนกรีต

2.10 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

บนพื้นฐานของข้อมูลของปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับน้ำ (Pourbaix, M., 1976) ได้พัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าเปรียบเทียบกับแผนภาพของสภาวะบริเวณความเป็นกรดและด่าง (pH) ซึ่งชี้ให้เห็นถึงช่วงที่มีความเสถียรภาพของเทอร์โมไดนามิกส์เป็นฟังก์ชันของศักย์ไฟฟ้าและค่า pH และแผนภาพพอร์แบร์กของเหล็ก ซึ่งถูกแบ่งแยกออกเป็น 3 สภาวะคือบริเวณส่วนที่เกิดสนิม บริเวณส่วนที่เกิดปฏิกิริยากับสารละลายน้อยและบริเวณส่วนที่ไม่เกิดสนิม สนิมที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีสภาพเป็นกรดจากแผนภาพจะเห็นเป็นช่องที่แคบสภาพความเป็นด่างจะผันแปรและทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดสนิมมากในขณะที่บริเวณอีก 2 ส่วนนั้นจะมีชั้นฟิล์มก่อตัวอยู่ซึ่งจะมีความเป็นด่างมากอยู่ในบริเวณ 2 ส่วนเหล่านี้จะอยู่ในสภาวะปกติไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นและในส่วนของ 3 จะเป็นส่วนที่ปราศจากสนิม (Immunity) เนื่องจากในส่วนของนี้มีสภาพความเป็นด่างที่มีเสถียรภาพสูงมากจึงเป็นสาเหตุทำให้เหล็กไม่เกิดสนิม ดังนั้นแผนภาพพอร์แบร์กจึงเป็นวิธีการเตรียมข้อมูลพื้นฐานภายใต้ความเข้าใจปฏิกิริยาการเกิดสนิมและจัดทำเป็นข้อกำหนดหลัก 2 ข้อสำหรับใช้กับแผนภาพนี้



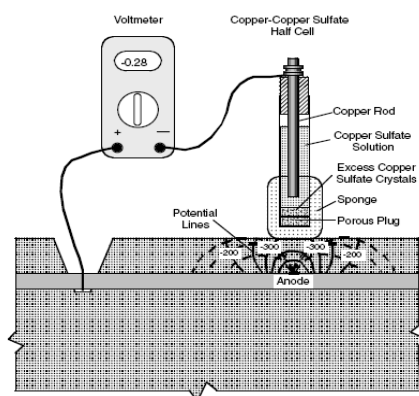
รูปที่ 2-28 แผนภาพกลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ที่มา: (Pourbaix, M., 1976)

2.11 ทฤษฎีการตรวจวัด

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตไม่สามารถคาดการณ์ได้ชัดเจนต้องรอจนกว่าคอนกรีตจะเกิดการเสียหายซึ่งสิ่งที่สามารถบ่งชี้ถึงการเสื่อมสภาพของโครงสร้างเช่น สนิมที่มีรอยต่างเป็นจุดๆที่ผิวของเหล็กเสริม รอยร้าวแตกแยกหลุดล่อนออกมาเป็นชิ้นๆ สำหรับการทำนายอายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมนั้นควรที่จะต้องกำหนดวิธีการซ่อมแซมหรือการทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กกลับคืนสู่สภาพใช้งานได้ตามปกติ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้เทคนิควิธีทดสอบแบบไม่ทำลายสำหรับใช้ประเมินความสามารถการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและใช้วัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็ก

2.12 วิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

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



รูปที่ 2-29 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้ทดสอบด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ตามมาตรฐาน ASTM C 876 โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต ที่มา: (ASTM C 876, 2002)

วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C-876 ดัง เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย Copper-Copper Sulfate มีการเชื่อมต่อสายไฟกับโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานต่อไฟฟ้าสลับประสิทธิภาพสูงและในส่วน of half-cell มีแท่งทองแดงแช่อยู่ในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวใช้เป็นเซลล์อ้างอิงสำหรับการวัดศักย์ไฟฟ้าของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีต การวัดค่าของศักย์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดของครึ่งเซลล์ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของศักย์ไฟฟ้าที่อ่านค่าได้และสำหรับการเชื่อมต่อของระบบ Half-Cell ทำได้โดยการเชื่อมต่อด้านที่เป็นบวกของโวลต์มิเตอร์ให้ติดกันกับเหล็กเสริมและอีกด้านของโวลต์มิเตอร์ที่เป็นลบให้เชื่อมติดต่อกับ Copper-Copper Sulfate โวลต์มิเตอร์ที่ใช้มีความละเอียดและประสิทธิภาพสูงเพียงพอสำหรับใช้อ่านค่าของศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่ำมาก ๆ แสดงได้ดังรูปที่การวัดศักย์ไฟฟ้าของเหล็กเสริมในคอนกรีตทำได้โดยใช้ Copper-copper sulfate half-cell เชื่อมต่อที่ผิวคอนกรีตเพื่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าครบวงจรโดยใช้ Porous Plug และพองน้ำที่เปียกชื้นด้วยสารละลาย detergent เป็นสื่อตัวนำไฟฟ้า

ถ้าหากเหล็กเสริมเกิดสนิมแสดงว่าอิเล็กตรอนในเหล็กจะเคลื่อนที่จากเหล็กเสริมไปยัง half-cell เพราะว่าด้านปลายของโวลต์มิเตอร์มีการเชื่อมต่อภายในวงจรไฟฟ้า 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) อย่างไรก็ตามค่าที่ถูกต้อง ๆ เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C876 และวิธีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้านี้ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับคอนกรีตและเหล็กเสริมที่มี epoxy เคลือบอยู่ที่พื้นผิว

วิธีเตรียมการทดสอบทำได้โดยกำหนดตำแหน่งของจุดให้มีลักษณะเป็นตารางโดยมีระยะห่างให้เหมาะสมตามลักษณะของโครงสร้างและปัจจัยที่ทำให้เกิดความผิดพลาด เช่นจุดที่กำหนดถ้ามีระยะห่างมากเกินไปหรือการเตรียมข้อมูลไม่เหมาะสมเพียงพอสำหรับการประเมินค่าในขณะที่ยกเว้นระยะห่างของเหล็กเสริมเต็มพื้นที่ก็จะทำให้มีค่าใช้จ่ายในการสำรวจเพิ่มขึ้นเช่นในการสำรวจพื้นผิวคอนกรีตของสะพานโดยทำตามมาตรฐาน ASTM C 876 แนะนำให้ใช้ระยะห่าง 1.20 ม. ถ้าความแตกต่างของแรงดันระหว่างจุดที่อยู่ใกล้กันมีค่าเกินกว่า 150 มิลลิโวลต์ ให้ถือว่าระยะห่างนั้นใช้ได้ อย่างไรก็ตามมีคำแนะนำอื่นๆ ที่กำหนดให้ระยะห่างควรมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของ 1.20 ม. สามารถให้ค่าความน่าเชื่อถือสำหรับการประเมินค่าการเกิดสนิมที่ยังดำเนินการอยู่และขยายออกไป (Clemen, G.G., Jackson, D.R, et al., 1992)

ค่าที่ยอมรับได้จากการทดสอบคือคอนกรีตต้องมีความชื้นอย่างเพียงพอที่จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรเป็นเหตุผลที่สำคัญในการวัดค่าและถ้าการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ด้วย

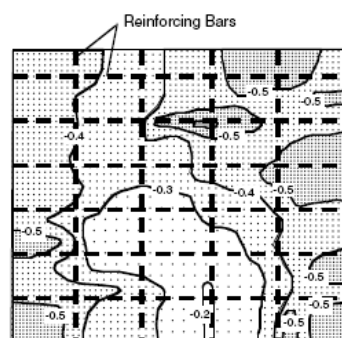


เวลาต้องทำตามมาตรฐาน ASTM C 876 ก่อนการทดสอบคอนกรีตต้องมีความเปียกชื้นเพียงพอและในขณะการทดสอบค่าที่วัดได้ไม่ควรเปลี่ยนแปลงมากกว่า ± 20 มิลลิโวลต์ ภายใน 5 วินาที (ASTM C 876) ถ้าหากค่าที่วัดได้มีความเสถียรไม่เพียงพอ อาจเป็นเพราะว่ากระแสไฟฟ้าภายในวงจรเกิดการหักเหทิศทางหรือความต้านทานของกระแสไฟฟ้าภายในวงจรมีมากเกินไป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

2.13 การวิเคราะห์ข้อมูลของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

การวิเคราะห์ข้อมูลตามมาตรฐาน ASTM C-876 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่อ่านได้สามารถนำมาใช้ร่วมกับข้อมูลอื่นๆ เช่น ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต ความลึกของคาร์โบเนชั่นในคอนกรีต สำหรับการแตกและหลุดล่อนของชั้นคอนกรีตที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมเปิดเผย ซึ่งการรวบรวมสรุปข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดสนิมที่ได้จากการสำรวจอย่างเป็นระบบด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สามารถแสดงให้เห็นได้ 2 แนวทางคือ 1. มีลักษณะเป็นแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอดทั้งเส้น 2. เป็นไดอะแกรมของความถี่สะสมของศักย์ไฟฟ้า ในขณะเดียวกันการรายงานค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการสำรวจต้องระบุให้ชัดเจนในการใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการสำรวจนำมาสรุปจัดทำเป็นแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าซึ่งสามารถทำได้โดยนำเอาค่าที่ได้จากการทดสอบในแต่ละจุดมาสร้างลงบนแปลนตามมาตรฐานของพื้นที่ทั้งหมดที่ได้ทำการทดสอบ สำหรับค่าแรงดันที่อ่านได้จาก half-cell ในแต่ละจุดของการทดสอบให้ทำเครื่องหมายไว้บนแปลนและเขียนเส้นชั้นความสูงซึ่งมีความต่างศักย์เท่ากันโดยใช้ค่าของแรงดันที่วัดได้ เป็นตัวอย่างของแผนที่เส้นชั้นความสูงที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอดความยาวทั้งเส้นตามมาตรฐาน ASTM C-876 แรงดันไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดที่วัดค่าได้ในแต่ละช่วงของเส้นชั้นความสูงไม่ควรมีความต่างเกิน 100 มิลลิโวลต์



รูปที่ 2-30 ตัวอย่างแผนที่เส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าที่สำรวจได้จาก half-cell potential
ที่มา : (ASTM C 876, 2002)

วิธีการของไดอะแกรมความถี่สะสมของศักย์ไฟฟ้าทำได้โดยการนำข้อมูลของศักย์ไฟฟ้ามาเขียนเป็นแผนผังแบบร่างลงบนกระดาษเพื่อหาความน่าจะเป็นสอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM C-876 โดยนำข้อมูลที่ได้จากการสำรวจทั้งหมดมาเขียนเป็นกราฟเส้นที่มีการปรับเปลี่ยนให้เข้ามาตรฐานพอดี (best-fit straight line) จากไดอะแกรมความถี่สะสมนำมาใช้โดยกำหนดค่าที่อ่านได้ของศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นร้อยละซึ่งเป็นค่าที่ให้ความแน่นอนเมื่อมีความเป็นลบมากกว่าและสามารถใช้ระบุเป็นค่าของการเกิดสนิมที่ระดับต่างๆ กัน (Elsener, B., et. al, 1990) จากทั้งสองวิธีการจะสอดคล้องกับมาตรฐาน ASTM C 876 สามารถที่จะใช้ในการประเมินผลได้ คือ เป็นวิธีการเชิงตัวเลขและเป็นเทคนิคที่แสดงความแตกต่างกันของศักย์ไฟฟ้า (potential difference technique) สำหรับวิธีการเชิงตัวเลขจะบ่งชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการเกิดสนิม

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

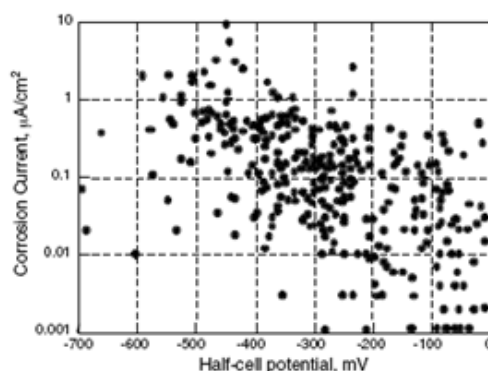
- ถ้าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นบวกมากกว่า -200 มิลลิโวลต์ มีความเป็นไปได้สูงที่เหล็กจะไม่เกิดสนิม
- ถ้าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นลบมากกว่า -350 มิลลิโวลต์ มีความเป็นไปได้สูงที่เหล็กจะเกิดสนิม
- ความไม่แน่นอนในการเกิดสนิมเมื่อค่าแรงดันอยู่ในช่วง -200 ถึง -350 มิลลิโวลต์

อย่างไรก็ตามข้อแนะนำให้ไปประยุกต์ใช้งานบนหลักการเชิงตัวเลขไม่ควรใช้ในสภาวะเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- การเกิด Carbonation ได้ขยายกว้างออกไปจนถึงระดับของเหล็กเสริมในคอนกรีต
- การประเมินสภาพคอนกรีตที่อยู่ภายในที่จัดเก็บไม่ได้อยู่ในสภาพเปียกชื้น
- เปรียบเทียบการกัดกร่อนของคอนกรีตที่อยู่ภายนอกกับความชื้นที่มีความแปรผันสูงหรือปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในคอนกรีต

จากข้อความข้างบนเป็นข้อแนะนำการระวังป้องกันในขณะทดสอบเพราะว่าเป็นสิ่งที่สำคัญต่อความต้านทานของคอนกรีตและออกซิเจนที่มีอยู่ทำให้เกิดอัตราการเกิดสนิมและ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ไม่ดีระหว่างวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์กับวิธีการวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม โดยวิธีการวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ (Feliu, S., Gonzalaz, J.A., and Andrade, C, 1996) สามารถอธิบายได้ว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมมีค่าน้อยกว่า $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ให้พิจารณาว่าเหล็กเสริมไม่เกิดสนิมแต่ถ้ามีค่ามากกว่า $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ให้พิจารณาว่าเหล็กเสริมจะมีโอกาสเกิดสนิมสูงมากดังแสดงตามรูปที่ด้านล่าง การนำไปประยุกต์ใช้งานต้องทำตามข้อแนะนำตามมาตรฐาน ASTM C-876





รูปที่ 2-31 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม(i_{corr})กับ ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ที่มา : (Feliu,S.,Gonzalez,J.A.,and Andrade,C.,1996)

วิธีการของศักย์ไฟฟ้าที่มีความแตกต่างกัน (potential difference technique) สำหรับบริเวณพื้นที่ๆ เกิดสนิมพื้นที่บริเวณนั้นจะแสดงให้เห็นถึงความลาดเอียงของศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าแตกต่างกันซึ่งเป็นพื้นฐานของ แผนภูมิเส้นชั้นความสูงของศักย์ไฟฟ้าสำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นเส้นชั้นความสูง (equipotential contour) ระยะห่างของเส้นชั้นความสูงของค่าแรงดันที่เป็นรูปที่ปิดแสดงให้เห็นว่าบริเวณนี้มีความลาดเอียงสูง ซึ่งบางครั้งในทางปฏิบัติค่าของแรงดันไฟฟ้าที่วัดค่าได้เปลี่ยนแปลงมากเกินไป ดังนั้นตัวบ่งชี้ที่แสดงให้เห็น การเกิดสนิมจะเป็นพื้นที่ผิว เช่นแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงมากกว่า 100 มิลลิโวลต์จะต้องมีพื้นที่มากกว่า 5 ตารางเมตร ดังนั้นวิธีการของ potential difference technique เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปในการบ่งชี้ให้เห็น ถึงบริเวณที่เกิดสนิมซึ่งมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการใช้เทคนิคเชิงตัวเลข (Elsener, B., Dawson, J.L., et. al.,1990)

การอ่านค่าศักย์ไฟฟ้าในสถานะที่เหล็กเกิดสนิมอย่างมีเหตุผลนั้นสามารถพิจารณาได้จากคอนกรีต จะต้องมีความชื้นอย่างเพียงพอและผู้ใช้ต้องมีความเข้าใจและยอมรับวิธีการใช้งานเมื่อคอนกรีตมีความชื้นไม่ เพียงพอสำหรับการวัดค่าซึ่งเป็นสิ่งสำคัญ นอกจากนี้มีหลายองค์ประกอบที่มีผลกระทบต่อขนาดของ ศักย์ไฟฟ้าที่อ่านค่าได้ ดังนั้นองค์ประกอบดังกล่าวจึงไม่สามารถที่จะให้ค่าที่ถูกต้องแท้จริงตามสภาพการเกิด สนิมได้ (Elsener, B., Dawson, J.L., et. al., 1990)

ปัจจัยหลากหลายที่มีผลกระทบกับวิธีการทดสอบการเกิดสนิมโดยผู้เชี่ยวชาญทางด้านการเกิดสนิม ได้ให้คำแนะนำที่เหมาะสมของวิธีการสำรวจด้วยศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้ (ASTM C-876)

- คอนกรีตต้องอยู่ในสภาวะที่ที่อิ่มตัวด้วยน้ำ
- คอนกรีตเกิด Carbonated ที่ระดับความลึกของเหล็กเสริม
- เหล็กเสริมที่เคลือบด้วย (galvanized)

ในการสำรวจค่าศักย์ไฟฟ้าควรมีการทดสอบเพิ่มเติมด้วยการทดสอบ Carbonation และปริมาณคลอไรด์ไอออนในคอนกรีต ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบควรสรุปเป็นข้อมูลให้ชัดเจนของค่าศักย์ไฟฟ้าที่สำรวจวัดค่าได้ ที่แสดงให้เห็นถึงบริเวณที่เกิดสนิมขณะที่ทำการทดสอบเวลานั้นและเงื่อนไขสภาพสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง

2.14 ความต้านทานของคอนกรีต

วิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นวิธีการที่แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ถึงบริเวณที่เหล็กจะเกิดสนิมในช่วงเวลานั้นที่ทำการวัดค่า จากที่ได้มีการอธิบายมาแล้วนั้น สรุปได้ว่าหลังจากที่เหล็กเกิดการสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม (Depassivation) และอัตราการเกิดสนิมจะขึ้นอยู่กับออกซิเจนที่ยังทำปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดและยังขึ้นอยู่กับความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีตด้วยทำให้ง่ายต่อการแพร่ของอิออนที่มีอยู่ทั่วไปในคอนกรีตระหว่างบริเวณขั้วแอโนดและขั้วแคโทด นอกจากนี้ความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับผิวของโพรงช่องว่างเล็กๆ ซึ่งเป็นโครงสร้างเล็กๆของเพสต์และปริมาณความชื้นของคอนกรีต ดังนั้นประโยชน์ที่ได้จากการทดสอบและสำรวจด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีต ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นลูกบาศก์ของวัสดุของความต้านทาน (โอห์ม) ต่อความยาว (Millard, S.G., et. al., 1989) โดยที่ ตัวนำทางไฟฟ้าเป็นความต้านทาน R ของพื้นที่คือ A และความยาวเป็น L ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทาน ρ ดังสมการ

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

มาตรฐานวิธีการทดสอบการวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตยังไม่มีการจัดทำเป็นมาตรฐาน แต่มีเทคนิคที่ใช้แล้วประสบความสำเร็จ ดังแสดงในรูปที่ 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) มีหลักการทำงานคือ ขั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกจะเชื่อมต่อกับแหล่งที่ให้กระแสไฟฟ้าและขั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายใน 2 ขั้วจะเชื่อมต่อกับเครื่องมืออ่านค่าแรงดันไฟฟ้า (โวลต์มิเตอร์) ดังนั้นค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีตสามารถแสดงได้ดังสมการ (Millard, S.G., Wenner, F., et. al., 1990)

$$\rho = \frac{2\pi sV}{I}$$



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

Millard, S.G., et al., 1990. นำเสนอผลที่ได้จากการทดลองศึกษาและวิเคราะห์ให้เป็นที่ยอมรับของอันดับขนาดที่มีความผิดพลาดระหว่างค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณและค่าความต้านทานที่แท้จริงเมื่อนำสมการไปประยุกต์ใช้กับชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตขนาดเล็ก ซึ่งมีหนึ่งตัวแปรที่ต้องพิจารณาคือระยะห่างที่น้อยที่สุดของขั้วไฟฟ้า เพราะเป็นส่วนประกอบของเพสต์และมวลรวมจะให้ค่าความต้านทานที่แตกต่างกัน จึงต้องให้ความสำคัญกับระยะห่างของขั้วไฟฟ้าอย่างเพียงพอ ดังนั้นค่าความต้านทานของคอนกรีตควรจะเป็นค่าเฉลี่ย สำหรับระยะห่างที่น้อยที่สุดของขั้วไฟฟ้าขึ้นอยู่กับขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบใช้เป็นค่าต่ำที่สุดของระยะห่าง ในขณะที่ระยะห่างก็ยังเป็นตัวแปรที่กำหนดระดับความลึกซึ่งมีผลกระทบต่อการวัดค่าด้วยเหมือนกัน ในขณะที่ชิ้นส่วนที่มีลักษณะตันหรือบางก็ต้องมีความสอดคล้องกับระยะห่างของขั้วไฟฟ้าด้วย

บนพื้นฐานจากการศึกษา Millard, S.G., et al., 1990. ได้แนะนำระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้ได้เหมาะสมมีค่าประมาณ 50 มิลลิเมตร ขนาดความกว้างและความลึกของชิ้นส่วนโครงสร้างควรจะมีอย่างน้อย 4 เท่าของระยะห่างขั้วไฟฟ้า นอกจากนี้ระยะจากขอบชิ้นส่วนไม่ควรน้อยกว่า 2 เท่าของระยะห่างของขั้วไฟฟ้า เมื่อขนาดต่างๆเหล่านั้นน้อยไม่เพียงพอ ค่าความต้านทานที่คำนวณได้ตามสมการก็จะให้ค่ามากเกินไป ปัจจัยอื่นๆที่มีผลกระทบต่อการคำนวณค่าความต้านทานแสดงให้เห็นได้ชัดเจน เช่น ชิ้นพื้นผิวที่บางมีผลทำให้ความต้านทานของคอนกรีตและเหล็กเสริมมีค่าต่ำกว่าค่าที่แท้จริง ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ให้ผลลัพธ์โดยตรงกับค่าความต้านทาน สำหรับปัจจัยอื่นที่มีผลกระทบต่อเหล็กเสริม เช่น ความลึกของระยะหุ้มคอนกรีตรวมถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมที่สูญเสียไปจะทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างรับกำลังลดลง

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



ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเสี่ยงของการเกิดสนิม

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

ที่มา : Feliu, S. et al., 1996.

ในอีกกรณีหนึ่ง Bungey ได้ให้แนวทางถึงความแตกต่างกันของข้อมูลระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเสี่ยงของการเกิดสนิม เมื่อเหล็กเสริมสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิมดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของคอนกรีตและความเป็นไปได้ในการเกิดสนิม

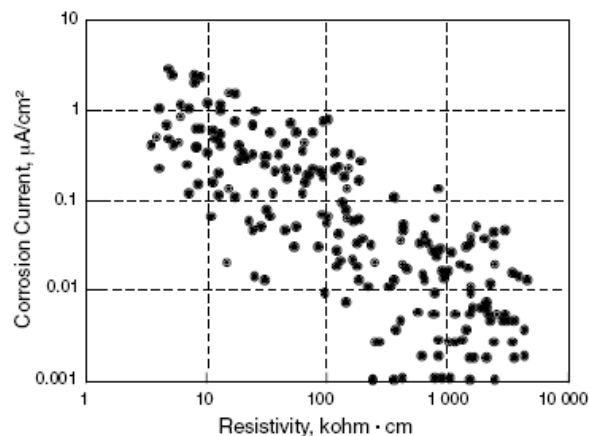
ความต้านทาน ($k\Omega \cdot cm$)	ความเป็นไปได้ของการเกิดสนิม (Nonsaturated Concrete)
> 20	ต่ำ
10 ถึง 20	ต่ำ / เหมาะสม
50 ถึง 10	สูง
< 5	สูงมาก

ที่มา : Bungey, J.H., 1989.

ความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดสนิมของคอนกรีตและความต้านทานของคอนกรีต (Feliu, S., Gonzalez, J.A., and Andrade, C., 1996) จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อเหล็กเสริมสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม ความต้านทานของคอนกรีตจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดสนิมได้ดีกว่าการวัดค่าด้วยวิธีการ half-cell potential

สรุปโดยย่อ การวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตเป็นการจัดเตรียมข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการประเมินความเป็นไปได้ของระดับการเกิดสนิมที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นการนำเอาประโยชน์ที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธีการศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาใช้ ค่าความต้านทานที่สูงที่ได้จากการสำรวจศักย์ไฟฟ้าแต่อัตราการเกิดสนิมอาจจะมีค่าต่ำ การอ้างอิงถึงความต้านทานของคอนกรีตที่มีความสัมพันธ์กับการแพร่กระจายของไอออนไปโดยทั่วคอนกรีตภายใต้การกระทำของศักย์ไฟฟ้าโดยรอบๆ ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด คอนกรีตที่มีความต้านทานเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณของโพรงช่องว่างในเพสต์มีจำนวนลดลงส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นอายุการใช้งานของคอนกรีตจึงเพิ่มขึ้น





รูปที่ 2-32 เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{corr}) และค่าความต้านทานของชิ้นส่วนคอนกรีตที่หมา : (Feliu, S., Gonzalez, J.A., and Andrade, C., 1996)

2.15 ความต้านทานโพลาริเซชัน

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

หลักการของเทคนิคความต้านทานโพลาริเซชันเป็นวิธีการที่ดีสำหรับใช้หาค่าอัตราการเกิดสนิม (Corrosion rate) ของเหล็กเสริม สอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM G-59 เป็นเทคนิคพื้นฐานของการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงใน Open Circuit potential (OCP) ของเซลล์ตัวนำไฟฟ้าแบบ Short-Circuited เมื่อมีกระแสไฟฟ้าจากภายนอกไหลผ่านเซลล์ จะทำให้ไฟฟ้าครบวงจรซึ่งวิธีการวัดของ LPR ที่นิยมใช้กันมี 2 วิธีการเรียกว่า Potentiostatically ทำได้โดยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็นช่วงทำให้ศักย์ไฟฟ้า (ΔE) เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งแปรผันไปตามค่าของกระแสไฟฟ้า (ΔI) ในขณะเวลานั้นสำหรับวิธีที่ 2 เรียกว่า Galvanostatically ทำได้โดยเพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็นช่วงทำให้กระแสไฟฟ้า (ΔI) เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งแปรผันไปตามค่าศักย์ไฟฟ้า (ΔE) ในขณะเวลานั้นโดยที่ค่าของแรงดันที่เปลี่ยนแปลงต้องอยู่ภายในช่วง 10-30 มิลลิโวลต์เท่านั้นค่าที่วัดได้จึงจะมีความถูกต้อง ซึ่งค่าเหล่านี้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (ΔE) และการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า (ΔI) ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่าง $\Delta E / \Delta I$ เรียกว่าความต้านทานโพลาริเซชัน (R_p) ดังสมการ เพราะว่ากระแสไฟฟ้าจะแสดงใน

เทอมต่อหน่วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าเป็น Polarized โดยที่ (R_p) มีหน่วยเป็นโอห์มพื้นที่ (ohms.cm^2) ตามมาตรฐาน ASTM G15

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

Stern and Geary (1957) ได้จัดทำขึ้นภายใต้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดสนิมของขั้วแอโนดและความต้านทานโพลาไรซ์ ซึ่งอธิบายได้จากความสัมพันธ์ของการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดและแคโทด และหาได้จากความลาดชันของกราฟเส้นโพลาไรซ์ของปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด เมื่ออัตราการเกิดสนิมแสดงอยู่ในรูปที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมซึ่งแปรผันโดยตรงกับความต้านทานโพลาไรซ์ (R_p) (ASTM G59) แสดงไว้ดังสมการ

$$I_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p}$$

โดยที่

$$I_{\text{corr}} = \text{ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม } (\mu\text{A/cm}^2)$$

$$B = \text{ค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้า (mV)}$$

$$R_p = \text{ความต้านทานโพลาไรซ์ (Ohms.cm}^2\text{)}$$

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

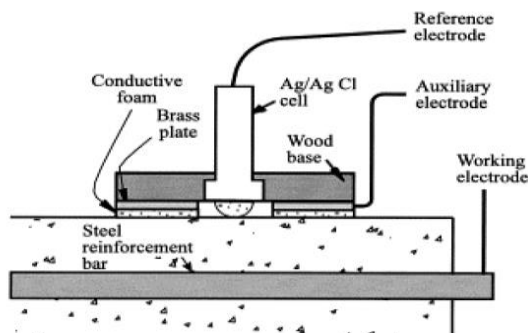
$$i_{\text{corr}} = \frac{I_{\text{corr}}}{A}$$

สิ่งที่ชี้ให้เห็นถึงกำลังของโครงสร้างที่เหลือยู่ทำได้โดยการประเมินอายุการใช้งานของโครงสร้างด้วยวิธีการทดสอบของ LPR ซึ่งเป็นวิธีการที่มีลักษณะเฉพาะโดยการนำเอาขั้วไฟฟ้า (Electrode) ซึ่งเป็นอุปกรณ์เสริมนำมาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยในการวัดค่าความต้านทานของคอนกรีตให้ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่เป็นการตั้งสมมุติฐานพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตให้อยู่ภายใต้ขั้วไฟฟ้า

อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ชัดเจนว่าการไหลของกระแสไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าไปยังพื้นผิวเหล็กเสริมซึ่งเป็นการส่งสัญญาณในลักษณะที่ไม่มีการจำกัดขอบเขตกระแสไฟฟ้าให้อยู่ภายใต้ขั้วไฟฟ้าส่งผลให้กระแสไฟฟ้าแพร่กระจายเกินออกไปทางด้านข้างซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ทราบโดยเฉพาะเหล็กเสริมที่มีพื้นที่ขนาดกว้างมาก (S. Felio, J.A. Gonzalez, C. Andrade., et al., 1988) เป็นเหตุให้ได้ผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้องเพราะว่าพื้นผิวของเหล็กเสริม



บริเวณที่โพลาไรซ์ (Polarized) ไม่ถูกต้องซึ่งทำให้การคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิม (i_{cor}) เกิดการผิดพลาดในขณะเดียวกันผลของการประเมินตรวจสอบโครงสร้างจะไม่ถูกต้องด้วย



รูปที่ 2-33 การวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยไม่มี 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

2.16 วิธีการวัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ในการที่จะตรวจสอบและประเมินค่าของ Corrosion Rate เป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการที่จะกำหนด Polarized Area ของเหล็กเสริม และสามารถที่จะทำให้การวัดค่า Corrosion Rate มีประสิทธิภาพได้โดยการใช้ guard electrode (GE) สำหรับใช้กำหนดขอบเขตของกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในขอบเขตที่จำกัด สำหรับตำแหน่งของ GE จะอยู่รอบๆ แกนกลางของ CE และเป็นการรักษาสภาพศักย์ไฟฟ้า เป็นผลให้การกระจายของสัญญาณจาก CE อยู่ในขอบเขตที่จำกัดมีพื้นที่ไม่มากกว่าจากจุดกึ่งกลางที่มีการแบ่งแยกเป็นสองส่วนระหว่าง CE และ GE เมื่อทั้งคู่เป็น electrode ที่มีความกว้างที่เท่ากันและภายใต้สมมุติฐานว่าคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่เหมือนกัน

วิธีการของเครื่องมือ GECOR 6 มีอุปกรณ์ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่วัดค่าการกักกร่อนและ 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 ซึ่งค่าความต่างศักย์ทุก ๆ ค่า 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 และมีแท่งทองแดงเป็นแกนกลางอยู่ภายใน Probe มีความยาว 17.1 ซม. และไม่มีอุปกรณ์ guard electrode

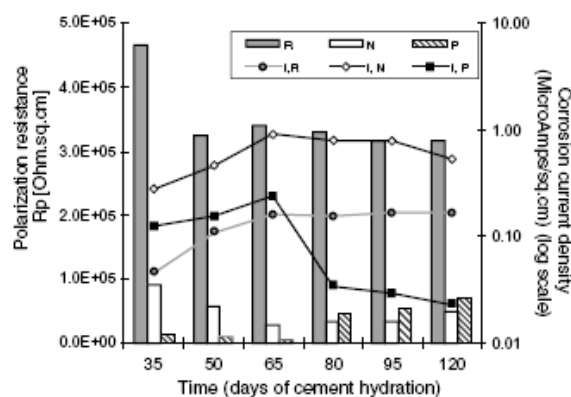
2.17 การใช้ความถี่ในการวัดค่า

วิธีการของเครื่องมือ CORROCATCH (NSC) ใช้หลักการควบคุมโดยใช้ galvanostatic double pulse เป็นการให้ 2 ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่มีช่วงจังหวะของการเดินที่แตกต่างกันเป็นส่วนที่ช่วยเสริม การเตรียมความถี่ที่มีค่าสูงมากสำหรับใช้วัดค่าความต้านทานของคอนกรีต (R_s) การวัดค่าโดยใช้ความถี่ที่ต่ำกว่าในการวัดค่าเป็นการรวมความต้านทานของคอนกรีต (R_s) และ Polarization Resistance (R_p) ดังนั้นในความแตกต่างกันระหว่างการเตรียมทั้งสองของ (R_p) ซึ่งสามารถที่จะคำนวณหากระแสของการกัดกร่อนและอัตราของการกัดกร่อนได้ เทคนิคที่ใช้จะแตกต่างจาก AC Impedance Technique ความถี่จะไม่ขึ้นลงอย่างรวดเร็ว แต่จะใช้สองความถี่เท่านั้น ความถี่ที่ใช้ในการควบคุมอาจจัดทำขึ้นมาให้เป็นแบบอัตโนมัติที่ความถี่ 1300 และ 0.02 Hz สำหรับค่าความถี่ที่ต่ำมากสามารถที่จะเลือกเป็น 1 mHz ซึ่งค่าอาจจะต่ำไปเพียงพอที่จะใช้ในการวัดค่า (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) จะช่วยรักษาค่าความเป็นศักย์ไฟฟ้าให้เท่ากันโดยการใช้แรงดันไฟฟ้า

วิธีการของเครื่องมือ PR Monitor เป็นเครื่องมือที่ใช้หาค่า Corrosion Rate ของเหล็กที่พัฒนาหลังจากสามวิธีการแรกโดยมีการตรวจสอบและประเมินจาก SHRP ใช้หลักการพื้นฐานที่เหมือนกันกับวิธีของ GCOR6 device มีอุปกรณ์ภายนอกเป็น guard electrode (CE) ซึ่งช่วยในการ Confinement Current ให้มีค่าสม่ำเสมอ ผลิตและจำหน่ายโดยบริษัท Cortest Instrument Systems in Texas



D.A.Koleva. et al. ได้ศึกษาและวิจัยการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในมอร์ต้ารูปที่ทรงกระบอกโดยใช้วิธีการของ LPR และ EIS ในการวัดค่าความต้านทานโพลาไรซ์ (Polarization Resistance, R_p) 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 จากรูปที่พบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{corr}) ของตัวอย่างกลุ่ม N จะเกิดสนิมสูงมากหลังจาก 65 วัน เพราะว่า (i_{corr}) มีค่าเข้าใกล้ $1 \mu A/cm^2$ และสำหรับตัวอย่างกลุ่ม P ค่า (i_{corr}) ลดเอียงลงในช่วงเวลา 65-80 วันและลดลงต่ำสุดที่ $0.03 \mu A/cm^2$ ซึ่งหมายความว่ากลุ่มตัวอย่าง P มีการป้องกันปฏิกิริยาที่ช้าลงจะเกิดสนิมได้ยากกว่ากลุ่ม N และสำหรับค่าความต้านทาน Polarization (R_p) วัดค่าโดยวิธี EIS จากรูปที่พบว่าตัวอย่างกลุ่ม P แนวโน้มทั่วไปของความต้านทาน (R_p) มีค่าเพิ่มขึ้น และในกลุ่มตัวอย่าง N แนวโน้มทั่วไปของความต้านทาน (R_p) มีค่าลดลง สรุปได้ว่าตัวอย่างทดสอบที่มีการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาที่ช้าลงจะมีอัตราการเกิดสนิมได้น้อยกว่า

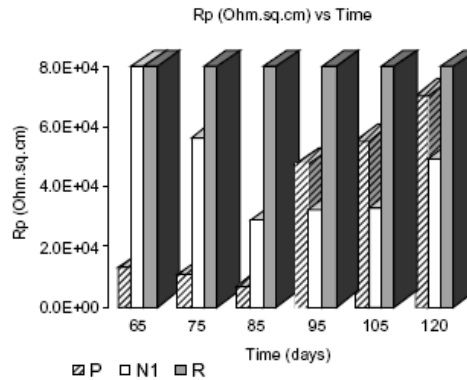


รูปที่ 2-34 การเปรียบเทียบความต้านทาน Polarization (R_p) โดยวิธี LPR

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

Ha-Won Song and Velu Saraswathy., (2007) ได้ศึกษาและวิจัยพบว่าค่าของพื้นที่โพลาไรซ์รอบเหล็กเสริมหากได้ค่าที่มีความผิดพลาดก็จะทำให้ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม (i_{corr}) ที่คำนวณได้มีค่าผิดพลาดซึ่งจะส่งผลกระทบให้การประเมินค่าอัตราการเกิดสนิมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กผิดพลาดไปด้วย ดังนั้นต้องทำการกำหนดขอบเขตพื้นที่ของกระแสไฟฟ้ารอบเหล็กเสริม โดยใช้อุปกรณ์ช่วยเป็น guraad electrod (GE) ให้ทำหน้าที่จำกัดขอบเขตของการไหลกระแสไฟฟ้าและแรงดันให้มีความเสถียรทำให้ได้ค่าอัตราการเกิดสนิมที่ถูกต้องดังรูปที่อย่างไรก็ตามปัจจัยอย่างหนึ่งที่มีผลกระทบต่อค่า polarization area และ (i_{corr}) คือความหนาของคอนกรีตที่ระยະหุ้มของเหล็กเสริม (J.Flis et al., 1998) สรุปว่าหาก polarization area

มีค่าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้ามีความเสถียร จากวิธีการดังกล่าวได้มีผลงานวิจัยในห้องทดลองให้ข้อมูลไว้เพื่อเป็นบรรทัดฐานในการพิจารณาสภาพการเกิดสนิม



รูปที่ 2-35 การเปรียบเทียบความต้านทาน Polarization (Rp) โดยวิธี EIS

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

ตารางที่ 4 กระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม เปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

อัตราการเกิดสนิม (I_{corr})	เงื่อนไขสถานะของเหล็กเสริม
$I_{corr} < 0.1 \mu A/cm^2$	สภาวะยังไม่เกิดสนิม
$I_{corr} 0.1 - 0.5 \mu A/cm^2$	อัตราการเกิดสนิมต่ำถึงปานกลาง
$I_{corr} 0.5 - 1.0 \mu A/cm^2$	อัตราการเกิดสนิมปานกลางถึงสูง
$I_{corr} > 1.0 \mu A/cm^2$	อัตราการเกิดสนิมสูง
วิธีการของเครื่องมือที่ไม่มี Guard Electrode	
$I_{corr} < 0.2 \mu A/cm^2$	สภาวะที่ไม่เกิดสนิม
$I_{corr} 0.2 - 1.0 \mu A/cm^2$	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)

2.18 พื้นที่สนามไฟฟ้า

จากความสัมพันธ์ของ Stern-Geary เป็นวิธีการที่ใช้ทดสอบแบบไม่ทำลายซึ่งใช้สำหรับหาค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต (Andrade,C.andJ.A.Gaonzalez.,1987) อย่างไรก็ตามในโครงสร้างคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมในปริมาณมาก และเป็นไปไม่ได้ที่ CE จะสามารถ Polarized area ของผิวของเหล็กเสริมได้

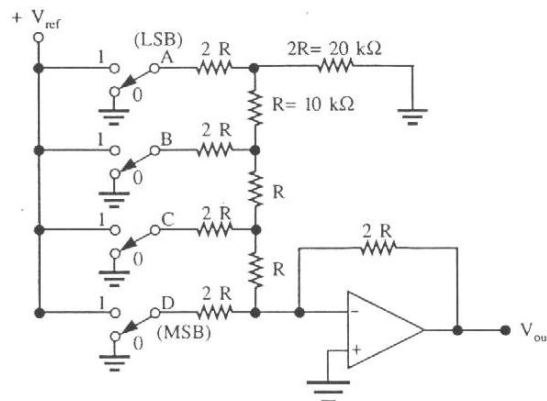
ทั้งหมด เพราะว่า CE จะทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณกระแสไฟฟ้าไปยังเหล็กเสริม (WE) ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้ว CE จะมีพื้นที่ในการส่งสัญญาณกระแสไฟฟ้าได้น้อยกว่า WE มาก ส่งผลให้การกระจายของสัญญาณที่อยู่เหนือเหล็กเสริมเป็นแบบไม่สม่ำเสมอและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ส่งสัญญาณไปก็จะลดลงและหายไปในที่สุดเมื่อ CE มีการเคลื่อนย้ายตำแหน่ง ดังนั้นการกระจายการส่งสัญญาณของกระแสไฟฟ้าจะเป็นแบบไม่สม่ำเสมอและขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ เช่นตำแหน่งของเหล็กเสริม (มีกระแสไฟฟ้าไม่มีความเสถียรและจะมีการกระจายอย่างมากสำหรับเหล็กเสริมที่ยังไม่เกิดสนิม) ค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต (สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ส่งไปยังเหล็กเสริมจะไม่มีค่าความเสถียรเป็นอย่างมากในคอนกรีตที่มีความต้านทานต่ำ) ขนาดของ CE ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าของ R_p ที่วัดได้ขึ้นอยู่กับ การกระจายของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริง (Feliu, S., J.A. Gonzalez, 1990) และการเลือกใช้คลื่นความถี่ เช่นถ้าพื้นที่ของ WE มีมากกว่า พื้นที่ของ CE ค่า Polarized area ขึ้นอยู่กับการรบกวนของความถี่ (Polarized area มีค่าเพิ่มขึ้นการรบกวนของความถี่จะมีค่าลดลง) (Macdonald, D., 1988)

2.19 วงจรและการประมวลผล

สัญญาณอนาล็อกและสัญญาณดิจิทัล เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณต่าง ๆ เช่น การตรวจจับสัญญาณแสงความร้อน อุณหภูมิ ความเร็วและตำแหน่ง โดยต้องใช้อุปกรณ์ตรวจจับต่าง ๆ ทำหน้าที่แปลงปริมาณทางฟิสิกส์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น แปลงปริมาณทางฟิสิกส์เป็นแรงดันไฟฟ้า หรือ ตัวแปลงสัญญาณอุณหภูมิเป็นแรงดัน สามารถแปลงอุณหภูมิ 1°C ต่อ 10 mV หรือตัวตรวจจับความเร็วรอบ สามารถแปลงความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาทีเป็นแรงดัน 100 mV เป็นต้น ตัวตรวจจับเหล่านั้นให้ปริมาณแรงดันไฟฟ้าออกมา แรงดันไฟฟ้านี้คือ สัญญาณอนาล็อกซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณทางฟิสิกส์ที่ตรวจจับได้ สัญญาณเหล่านี้เมื่อนำมาประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์จะต้องมีการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล การจะส่งสัญญาณกลับออกมาเป็น อนาล็อก จึงต้องใช้วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก ระบบดิจิทัลที่รับแรงดันอนาล็อกในย่าน 0 – 10 V มาแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยตัวแปลงอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และส่งสัญญาณดิจิทัลเข้าวงจรประมวลผลด้วยระบบดิจิทัล (Digital processing unit) เมื่อประมวลผล โดยแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกด้วยวงจรตัวแปลงดิจิทัลเป็นอนาล็อก จะได้แรงดันอนาล็อกด้านออก 0 – 10 V เหมือนกับสัญญาณแรงดันเข้าวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกแบบ $R/2R$ แลตเตอร์

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





รูปที่ 2-36 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก 4 บิต แบบ R/2R แลตเตอร์
ที่มา : Malfaor 2001

การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Converter) วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบสัญญาณลาดเอียง วงจรการแปลงอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล วงจรพื้นฐานแสดงด้านอินพุตของวงจรรับแรงดันอนาล็อก และวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ทำหน้าที่แปลงแรงดันอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 4 บิต ค่าแรงดันต่ำสุด 0 V จะได้รับรหัสดิจิทัลเอาต์พุต 4 บิต เท่ากับ 0000 และที่ค่าแรงดันอินพุต จะได้รับรหัสดิจิทัลเอาต์พุต 4 บิต เท่ากับ 1111



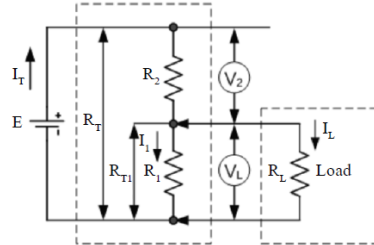
รูปที่ 2-37 อนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล
ที่มา : Malfaor 2001

2.20 วงจรการปรับความถี่ด้วยหลักการการแบ่งแรงดันและกระแส

วงจรแบ่งแรงดันเป็นสภาวะของวงจรที่ต่อโหลด (Load) เข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะทำให้มีกระแสไฟฟ้า ไหลในวงจรเกิดขึ้น โดยกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานแต่ละตัวที่ทำหน้าที่แบ่งแรงดันวงจรเปอร์เซ็นต์ของกระแสไหล มีการต่อวงจร ดังวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider Circuit) หมายถึงวงจรที่ประกอบด้วยความต้านทาน 2 ตัวขึ้นไปต่ออนุกรม (Series) อยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Power Supply) โดยค่าความต้านทานในวงจรจะทำหน้าที่แบ่งแรงดันไฟฟ้าในวงจร ซึ่งแบ่งวงจรออกเป็น 2 แบบ คือ

1. วงจรแบ่งแรงดันที่ไม่มีโหลด (Unloaded Voltage Divider) เป็นวงจรในสภาวะที่ยังไม่ต่อโหลดเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดัน ไฟฟ้า โดยจะมีตัวต้านทานต่อ อนุกรมอยู่กับวงจร ในสภาวะนี้ยังไม่มีกระแสไฟฟ้าจ่ายสู่โหลด (Load) ที่ต่ออยู่ภายนอก

2. วงจรแบ่งแรงดันที่มีโหลด (Load Voltage Divider) เป็นสภาวะของวงจรที่ต่อโหลด (Load) เข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะทำให้มีกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2-38 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

จากวงจรจะได้ความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$R_{T1} = \frac{R_1 \times R_L}{R_1 + R_L}$$

ดังนั้น

$$R_T = R_{T1} + R_2$$

และสมการหาค่าแรงดันจะได้

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

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

$$V_2 = E - V_L$$

สมการหาค่ากระแสจะได้



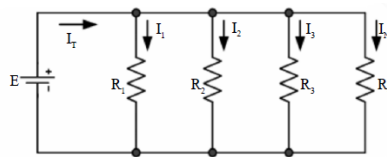
$$I_L = \frac{V_L}{R_L}$$

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

$$I_T = I_1 + I_2$$

วงจรแบ่งกระแส

วงจรแบ่งกระแสไฟฟ้า (Current Divider Circuit) ประกอบด้วยความต้านทาน 2 ตัวขึ้นไปต่อขนาน (Parallel กับแหล่งจ่าย Power Supply) โดยค่าของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทาน (Resistor) ที่แบ่งกระแส ออกมานั้นจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่ต่ออยู่ในวงจร ถ้าใช้กฎของโอห์ม วงจรแบ่ง ใช้หลักการของ วงจรไฟฟ้าแบบขนาน (Parallel Circuit) เนื่องจากวงจรขนานมีกระแสไหลผ่านตัวต้านทานหรือโหลดในแต่ละ สาขาไม่เท่ากัน (หากความต้านทานมีค่าไม่เท่ากัน) กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งให้ไหลผ่านไปในสาขาต่างๆ ตามพิกัดความต้านทานของโหลดนั้นๆ แต่เมื่อนากระแสที่ไหลผ่านโหลดทุกตัวในวงจรมารวมกันแล้วจะมี ค่า เท่ากับกระแสที่จ่ายให้แก่วงจร



รูปที่ 2-39 ความต้านทานต่อขนานกันหลายตัว

ที่มา : John 2003

พิจารณาจากคุณสมบัติวงจรขนาน จะได้แรงดันไฟฟ้า ดังนี้

$$E = V_{R1} = V_{R2} = V_{R3} = V_{RN}$$

หรือกฎของโอห์ม จะได้

$$I_T R_T = I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3 = I_N R_N$$

$$I_N = I_T \frac{R_T}{R_N}$$

เมื่อ

I_N = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทานใดๆ

I_T = กระแสไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่ไหลในวงจร

R_N = ความต้านทานแต่ละตัวที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

2.21 โปรแกรมคอนโทรลเลอร์

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



รูปที่ 2-40 โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์
ที่มา : Omron.Co.Ltd 2008

2.22 การประมวลผลโปรแกรม

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

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการศึกษาพัฒนาคลื่นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อใช้ในการวัดการเกิดสนิมเพื่อหาค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต สำหรับอุปกรณ์และวิธีการทดลองดังนี้

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานจัดสร้างและทดสอบ

1. เครื่องควบคุมแบบตรรกะ (Programmable Logic Controller)
2. เครื่องควบคุมรับและส่งค่าสัญญาณอนาล็อก (A/D, D/A)
3. เครื่องทดสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potential test)
4. จอควบคุมแบบโปรแกรมได้ (Touch Screen NS5)
5. เครื่องวัดค่าศักย์ไฟฟ้า
6. ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อทดสอบ
7. สารละลายโซเดียมคลอไรด์เร่งการเกิดสนิมเหล็ก
8. ตัวตรวจจับโลหะแบบใช้คลื่นความถี่สูง
9. เครื่องมือวัดโพราโลเซชัน (LPR)
10. โปรแกรมการวิเคราะห์ค่าการควบคุม
11. ถังสำหรับแช่ตัวอย่าง ขนาด 120*150 เซนติเมตร
12. อุปกรณ์สำหรับผสมสารละลายเร่งการเกิดสนิม
14. แผ่นพลาสติกใส
15. เทปพันสายไฟ
16. ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1
17. เหล็กเส้นกลมผิวเรียบผ่านศูนย์กลาง 9 มม.
18. มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ขนาดโตสุด 3/4
19. แบบหล่อคอนกรีตขนาด 10 x 10 x 35 ซม.
20. สายสัญญาณ ควบคุม และสายลิงก์
13. Volt meter ที่มีความละเอียดในย่าน mV
14. Amp meter ที่มีความละเอียดในย่าน μ A
15. สายวัดสัญญาณที่มีสารละลายตัวนำไฟฟ้า
16. โอห์มมิเตอร์ เพื่อวัดค่าความต้านทาน
17. เครื่องทดสอบการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า



18. เครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรง
19. เครื่องทดสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์
20. ชุดควบคุมกำลังไฟฟ้า

3.1 วิธีการสร้างเครื่องมือวัด

ในการจัดสร้างชุดเครื่องมือวัดค่าอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตจะจัดแบ่งตามขั้นตอนการสร้างต้นแบบดังต่อไปนี้

1. ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมที่ใช้สร้างเครื่องมือวัด
2. การรับค่าสัญญาณนอกจากการวัด
3. ออกแบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและต่อสายกับอุปกรณ์รับและส่งค่าโดยทำการต่อสายสัญญาณเข้ากับพีแอลซี (PLC)
4. ทดสอบการทำงานของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
5. การรับค่าและส่งค่านอกเข้าสู่โปรแกรมจัดตั้งอุปกรณ์เข้าสู่ระบบการวัด และจำลองการระบบอัตโนมัติ
6. การรับค่าและส่งค่านอกเข้าสู่โปรแกรมเครื่องมือวัด
7. การเขียนโปรแกรมเพื่อสั่งการอุปกรณ์การวัดค่าแสดงผลการวัดค่าทดสอบการวัดและเก็บค่าคลื่นสัญญาณไฟฟ้า



รูปที่ 3-1 ขั้นตอนการพัฒนาเครื่องมือวัดอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

3.2 วัสดุและปฏิกาส่วนผสมคอนกรีต

วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้างของบริษัทปูนซีเมนต์ไทย
- วัสดุมวลรวมหยาบใช้หินปูนย่อยขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว
- มวลรวมละเอียดทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (SSD)
- เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม.



รูปที่ 3-2 การหล่อแท่งคอนกรีตเพื่อทดสอบ

ปฏิกาส่วนผสมคอนกรีต

ในการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดคอนกรีตให้มีกำลังรับแรงอัด 240 กก./ซ.ม.^2 โดยออกแบบตามมาตรฐานของ ACI มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ w/c เท่ากับ 0.40 และค่าการยุบตัวเท่ากับ 8 ซม. โดยมีปฏิกาส่วนผสมคอนกรีตและคุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้



รูปที่ 3-3 การบ่มแท่งคอนกรีตให้เกิดสภาวะการเกิดสนิมเสมือนจริง

ตารางแสดงปริมาณส่วนผสมคอนกรีต 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)

ตารางแสดงคุณสมบัติของเหล็กเสริมคอนกรีต

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

3.3 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก

จัดทำตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 10 x 10 x 35 ซม. ดังแสดง จำนวน 12 ตัวอย่าง โดยมี ปริมาณส่วนผสมคอนกรีตดังแสดงในตารางและน้ำที่ใช้ในการเตรียมคอนกรีตเป็นน้ำประปาโดยใช้เหล็กเสริม ชนิด RB ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. โดยยื่นปลายเหล็กออกจากตัวอย่างเพื่อทำเป็นจุดเชื่อมต่อ กระแสไฟฟ้าสำหรับใช้เร่งให้เหล็กเกิดสนิมและหลังเกิดกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยในการศึกษาในครั้งนี้ได้ ทำการผสมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในอัตราส่วนร้อยละ 5 10 และ 15 ต่อน้ำหนัก เพื่อการจำลองสภาพให้ คอนกรีตเสริมเหล็กให้อยู่ในสภาวะสิ่งแวดล้อมทะเลด้วยการใช้คลอไรด์เป็นส่วนผสมอยู่ในคอนกรีตแทนน้ำทะเล จริง เนื่องจากความจำกัดด้านเวลาในการซีเมนต์ผ่านของคลอไรด์ และทำการทดสอบค่ายุบตัวด้วยอุปกรณ์วัดค่าการ ยุบตัว (Slump test) โดยวิธีดังกล่าวเป็นที่ยอมรับได้ในงานวิจัยของต่างประเทศ (C. Arya et al., 1996) โดยทำ การบ่มตัวอย่างในน้ำประปาเป็น หลังจากนั้นก็จึงจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่เหล็กเสริมเพื่อช่วยเร่งให้เหล็กเกิดสนิมเร็ว ขึ้น





รูปที่ 3-4 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตและการเร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า

3.4 วิธีการวัดค่าด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential) เพื่อตรวจสอบโอกาสในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM-C876



รูปที่ 3-5 การวัดการเกิดสนิมด้วยวิธีความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งสองชุดที่ไม่ได้เร่งด้วยกระแสไฟฟ้าและชุดที่เร่งด้วยกระแสไฟฟ้า การเก็บค่าการวัดให้เก็บค่าทุกๆ 7 วันเป็นเวลา 2 เดือนและทำการเปรียบเทียบแต่ละตัวอย่างที่มีปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 5, 10, 15 และ 0 ตามลำดับของชุดตัวอย่างที่เร่งด้วยกระแสไฟฟ้าและไม่ไดเร่งไฟฟ้า

ขั้นตอนและวิธีการวัดค่ามีดังนี้

1. ทำเครื่องหมายที่ตำแหน่งต่างๆบนที่ต้องการทำการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ โดยกำหนดตำแหน่งตรงจุดตัดและบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริมที่มีการเชื่อมต่อกับกระแสไฟฟ้า
2. ราดน้ำให้ทั่วให้ชุ่มเพื่อให้หน้าสัมผัสเข้าไปภายในคอนกรีตนำผ้าชนิดหนาชุบน้ำมาคลุมไว้เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำจาก และรีบทดสอบทันที

3. เตรียมเครื่องมือในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของคอนกรีตด้วยวิธีครึ่งเซลล์ (Half Cell Potential) โดยใส่ Copper (II) Sulphate ลงในหลอดเครื่องมือโดยให้สารละลายอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ แล้วใส่น้ำลงไป ในขวดอุปกรณ์แล้วจึงประกอบอุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกัน

4. ต่อเครื่องวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เข้ากับเหล็กที่ยื่นออกมาจากคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้ขั้วลบต่อเข้ากับเหล็กเสริมและขั้วบวกต่อเข้ากับเครื่องมือวัดและนำไปวางบนตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้แล้วอ่านค่าที่ได้ แล้วจดบันทึกค่าโดยหาค่าเฉลี่ย 5 ครั้งต่อการวัดค่าหนึ่งจุด

3.5 การวัดค่าทดสอบด้วยเครื่องมือวัดค่าด้วยคลื่นสัญญาณไฟฟ้า

ขั้นตอนหลักในการใช้งานเครื่องมือวัดค่าด้วยคลื่นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อหาความต้านทาน ใน Potentiostatic Mode ดังต่อไปนี้

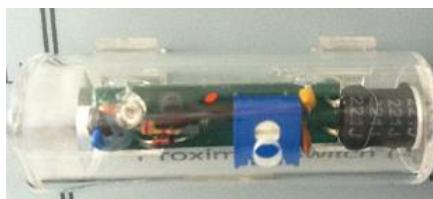


รูปที่ 3-6 การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือโดยใช้วิธีความต้านทานโพลาไรซ์

1. ทำการเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้ากับเหล็กเสริม(WE) ของตรงปลายเหล็กที่ยื่น
2. กำหนดบริเวณเหล็กเสริมสำหรับวัดค่าการเกิดสนิม โดยให้ผิวคอนกรีตอยู่ในสภาวะที่เปียกและกำหนดตำแหน่งเครื่องมือให้อยู่ตรงกึ่งกลางเหนือเหล็กเสริมที่ต้องการทดสอบ
3. ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ในสภาวะเปียกชื้นตลอดเวลาในการวัดค่า
4. วัดค่า Open Circuit Potential, E_0 จะมีความสัมพันธ์กับ Reference electrode เป็นการวัดแบบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

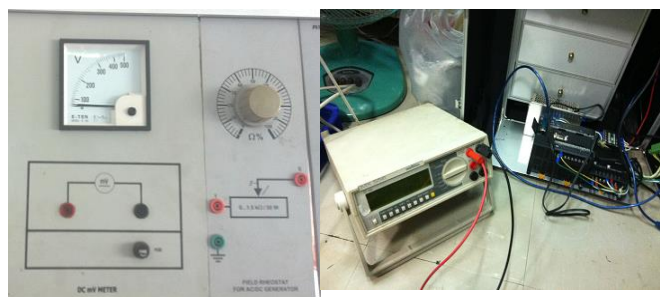


รูปที่ 3-7 การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือโดยใช้วิธีการส่งคลื่นเพื่อหาความต้านทานโพลาไรซ์



รูปที่ 3-8 เซนเซอร์ส่งคลื่นความถี่ในการตรวจสอบ

5. ทำการวัดกระแสไฟฟ้าจาก CE ไปยัง WE โดยใช้แรงดันที่มีความแตกต่างกันอยู่ในช่วงไม่เกิน -10 ถึง -30 mV ในการเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าของ WE โดยเพิ่มแรงดันให้อยู่ในอัตรา เท่าๆกัน บันทึกค่าของศักย์ไฟฟ้า (E) ที่จ่ายไปและบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่อ่านค่าได้ในขณะนั้น



รูปที่ 3-9 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบผล

6. ทำซ้ำตามขั้นตอนเดิมโดยเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณความถี่อย่างน้อย 5 ครั้ง เพื่อค่าไปคำนวณหาความชันของเส้นตรง (Slope) เป็นค่าความต้านทาน Polarization (R_p) ที่ตรงตำแหน่งนั้น ในขณะที่หากความชันที่คำนวณได้ไม่เป็นเส้นตรงให้ปรับแก้ค่าในช่วงนั้นโดยการวัดค่าใหม่



รูปที่ 3-10 การปรับค่าความถี่ควบคุม

7. คำนวณหาตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ช่องเหล็กเสริมที่มีผลกระทบกับการวัดค่ากระแสไฟฟ้า โดยดูจากที่ช่องเหล็กเสริมที่อยู่ใต้ Probe โดยอ้างอิงจากเส้นผ่านศูนย์กลางของ Probe นำมาคำนวณหาค่าเหล็กเสริม



รูปที่ 3-11 การรักษาระดับกำลังเพื่อคงค่าความถี่ควบคุม

8. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า(E) กับกระแสไฟฟ้า (I) ต่อหน่วยของเหล็ก และหาความชันของเส้นตรง(Slope) เป็นค่าความต้านทาน Polarization (R_p)



รูปที่ 3-12 การสร้างความสัมพันธ์การรับค่าจากเซนเซอร์ทดสอบคลื่น

9. คำนวณค่าอัตราการเกิดสนิม (i_{corr}) โดยพิจารณาจากค่า สัมประสิทธิ์ B ส่วนด้วยความต้านทาน Polarization (R_p) โดยที่ค่า $B = 26 \text{ mV}$



รูปที่ 3-13 การสร้างความสัมพันธ์และเงื่อนไขในการคำนวณค่า

10. นำค่าอัตราการเกิดสนิม (i_{corr}) ที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับเงื่อนไขของสถานะของเกิดสนิม โดยพิจารณาจาก $i_{corr} < 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ แสดงถึงสถานะที่เหล็กยังไม่เกิดสนิม และหาก $i_{corr} > 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ แสดงถึงสถานะที่เหล็กเกิดสนิมแล้ว



บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

จากผลการทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่จำลองอยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์โดยนำค่าที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐาน ASTM C 876 และโดยมีเงื่อนไขขอบเขตของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กถูกจำลองให้อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเลได้ถูกกำหนดให้มีส่วนผสมของปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 0% 5% 10% และ 15% ของน้ำหนักซีเมนต์ตามลำดับ ตัวอย่างแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กแบ่งออกเป็น 2 ชุดคือชุดแรกกำหนดให้เร่งการเกิดสนิมด้วยวิธีการใช้กระแสไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 8 โวลต์และชุดที่สองกำหนดให้ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าสำหรับวิธีการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากำหนดให้วัดตรงบริเวณมุมเหล็กเสริมและบริเวณตรงกลางของเหล็กเสริมซึ่งเป็นเหล็กเสริมที่เหมือนกันดังผลการทดสอบตามตารางที่ 4-1 ถึงตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4.1 ค่าความต่างศักย์ของไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความน่าจะเป็นที่จะเกิดการกัดกร่อน ASTM C 876

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

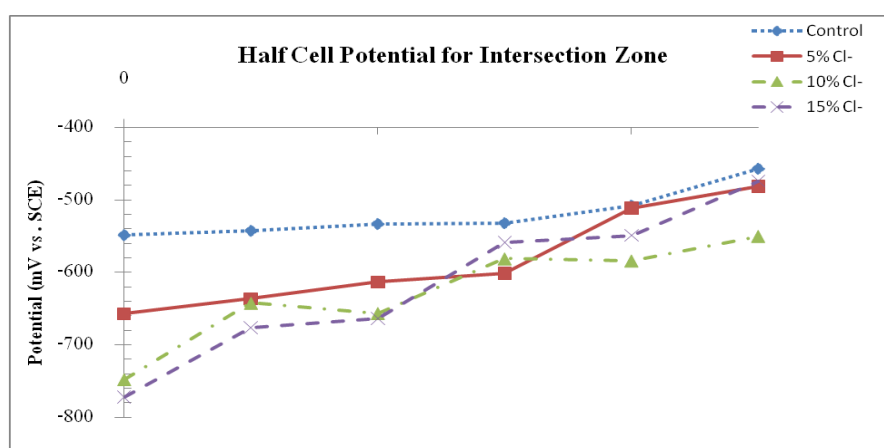
ตารางที่ 4.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล

ค่าของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์							
มีการเร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า							
เวลา เงื่อนไข	ระยะเวลา (สัปดาห์)						
	0	1	2	3	4	5	6
Control	-555	-548	-542	-533	-532	-508	-457
5% Cl ⁻	-685	-657	-636	-613	-601	-511	-481
10% Cl ⁻	-772	-747	-642	-656	-581	-583	-550
15% Cl ⁻	-781	-772	-676	-663	-558	-549	-474



จากผลการทดสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้กระแสไฟฟ้าเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในแผ่นคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่มีคลอไรด์เป็นส่วนผสมที่ร้อยละ 5% 10% และ 15% ตามลำดับที่อายุของคอนกรีต 0 1 2 4 5 และ 6 สัปดาห์ตามลำดับ โดยทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งเดียวกันทุกครั้ง พบว่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ทุกตัวอย่างที่วัดค่าได้มีค่าติดลบสูงมากกว่า -350 mV ที่ระยะเวลาเริ่มตั้งแต่ 3 สัปดาห์ ทุกตัวอย่างมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันแสดงให้เห็นว่าเหล็กเสริมมีความน่าจะเป็นที่จะมีโอกาสเกิดสนิมสูงถึง 90% เมื่อระยะเวลาการบ่มของแผ่นของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น แนวโน้มของค่าศักย์ไฟฟ้าไม่แปรผันไปตามระยะเวลาและเมื่อพิจารณาถึงแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มการเกิดสนิมสูงกว่าตัวอย่างแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เร่งด้วยกระแสไฟฟ้า เนื่องจากเหล็กเสริมที่เร่งด้วยกระแสไฟฟ้าสูญเสียอิเล็กตรอนมากกว่า และในกรณีของบริเวณตำแหน่งที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์แตกต่างกันที่จุดตัดและตรงกลางของเหล็กเสริมให้ค่าความต่างศักย์ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน

จากผลการทดสอบวัดค่าดังแสดงในรูปที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของตัวอย่างแผ่นคอนกรีตที่ไม่ได้เร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่มีส่วนผสมของคลอไรด์เมื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของเหล็กเสริมพบว่า แผ่นคอนกรีตที่มีเปอร์เซ็นต์ของคลอไรด์ในส่วนผสมที่มีค่าสูงจะมีแนวโน้มของการเกิดสนิมสูงกว่าโดยไม่แปรผันไปตามเวลาทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากผลกระทบจากปัจจัยที่หลากหลายเช่นปริมาณความชื้นที่ไม่เพียงพอมีผลทำให้คอนกรีตมีความต้านทานสูงค่าความต่างศักย์จะต่ำ ความหนาของคอนกรีต ผิวของคอนกรีตมีความต้านทานสูงมีผลทำให้ค่าความต่างศักย์ตรงจุดนั้นมีค่าต่ำ บริเวณผิวโดยรอบเหล็กเสริมที่เกิดสนิมจะมีความต้านทานสูงจะมีผลกระทบต่อค่าความต่างศักย์ที่ทำการวัดค่าในขณะนั้น สาเหตุทั้งหมดดังที่กล่าวมานี้มีผลต่อการตัดสินใจในการประเมินการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง



รูปที่ 4-1 ความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมของเหล็กในแผ่นคอนกรีตที่เร่งการเกิดสนิมโดยวิธีการของ Half-Cell Potential

4.2 วัดค่าด้วยคลื่นไฟฟ้า

หลักการของเทคนิคการวัดด้วยคลื่นสัญญาณไฟฟ้า คือเมื่อคลื่นส่งสัญญาณไปสู่เหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีต สัญญาณคลื่นจะถูกเหวี่ยงและส่งปริมาณสัญญาณค่าการสะท้อนออกมา ในรูปแบบของความเข้มแสงที่มีต่อเหล็กเสริมในคอนกรีตกับช่วงระยะเวลาในการตอบสนอง ผู้วิจัยได้ทำการสเกลค่าจากพารามิเตอร์ทั้งสองแบบเพื่อให้เกิดค่าความสอดคล้องในรูปแบบของความต้านทานแบบโพลาไรซ์ และนำสัญญาณแปลงมาเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นด้วยหลักการของ LPR โดยที่ความต้านทานโพลาไรซ์เป็นวิธีการสำหรับใช้หาค่าอัตราการเกิดสนิม (Corrosion rate) ของเหล็กเสริมสอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM G-59 เป็นวิธีการหาค่ากระแสไฟฟ้าของการเกิดสนิมเพื่อนำเอาไปคำนวณหาอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งจากงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการของ Linear polarization resistance (LPR) เป็นหลักการของ Potentiostatically ทำได้โดยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแต่ในงานวิจัยนี้เป็นการเพิ่มสัญญาณความถี่ของคลื่นให้ได้ค่าเทียบเคียงกับค่าศักย์ไฟฟ้า (ΔE) เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งแปรผันไปตามค่าของกระแสไฟฟ้า (ΔI) ซึ่งค่าเหล่านี้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (ΔE) และการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยที่ของชั่วไฟฟ้า (ΔI) ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่าง $\Delta E / \Delta I$ เรียกว่าความต้านทานโพลาไรซ์ (R_p) มีหน่วยเป็นโอห์มพื้นที่ (ohms.cm^2)

การผลการทดสอบค่าที่คำนวณได้ของการส่งคลื่นเพื่อค่าความต้านทานโพลาไรซ์เซชัน (R_p) เมื่อพิจารณาความต้านทานโพลาไรซ์ พิจารณาตัวอย่างคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่มีเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมของคลอไรด์เพิ่มมากขึ้นพบว่าค่าความต้านทานโพลาไรซ์มีแนวโน้มลดลงตามลำดับ ทั้งนี้ไม่แปรผันไปตามระยะเวลาที่ทำการทดสอบวัดค่า และเมื่อพิจารณาในกรณีใช้คลื่นสัญญาณไฟฟ้าตาม พบว่าให้ค่าความต้านทานโพลาไรซ์มีแนวโน้มสอดคล้องกันแต่ค่าความต้านทานโพลาไรซ์มีแนวโน้มให้ค่าที่ต่ำกว่า



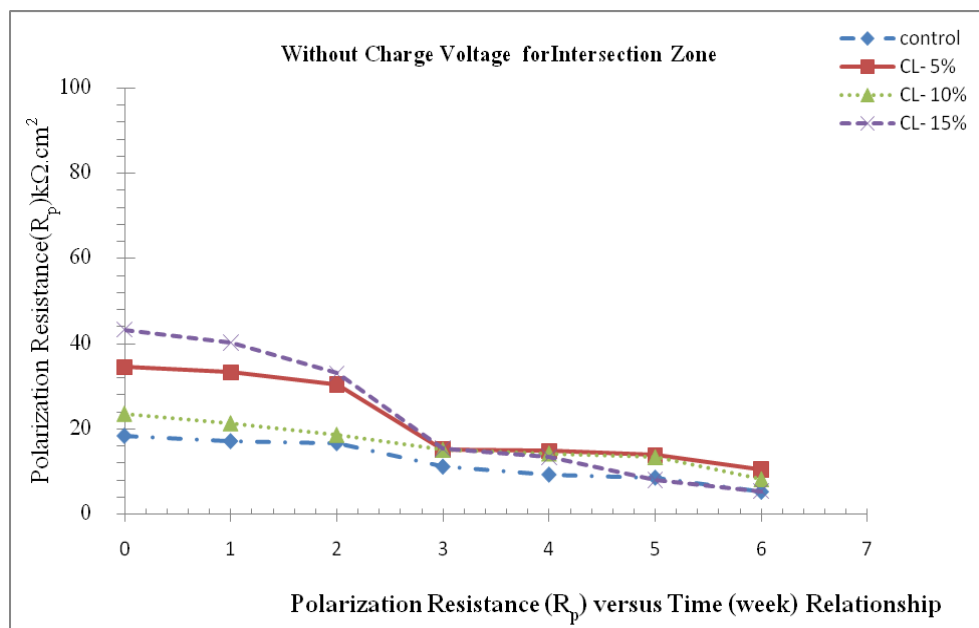
ตารางที่ 4-3 ค่าความต้านทานโพลาไรซ์เซชัน (R_p) ของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 40x 40 ซม

เวลา (สัปดาห์)	ค่าของ R_p บริเวณตรงริมเหล็กเสริม ($K.\Omega.cm^2$)			
	Control	1% Cl^-	10% Cl^-	15% Cl^-
0	16.3	30.09	10.55	61.3
1	16.56	31.35	10.91	42.80
2	17.6	29.48	22.59	15.05
3	9.14	9.20	9.30	10.16
4	8.28	13.80	9.20	12.31
5	6.56	13.80	8.35	15.05
6	2.76	9.11	15.16	6.41

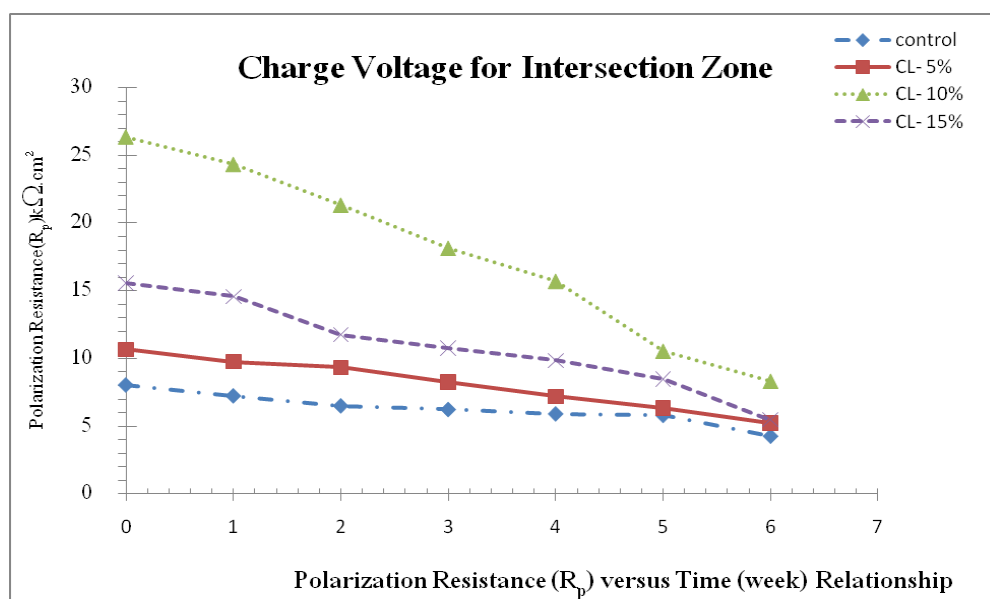
ตารางที่ 4-4 ค่าความต้านทานโพลาไรซ์เซชัน (R_p) ของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 10x10 x 30 ซม

เวลา (สัปดาห์)	ค่าของ R_p บริเวณตรงกลางเหล็กเสริม ($K.\Omega.cm^2$)			
	Control	5% Cl^-	10% Cl^-	15% Cl^-
0	8.02	10.66	26.36	15.56
1	7.23	9.76	24.33	14.58
2	6.5	9.34	21.32	11.76
3	6.23	8.26	18.14	10.78
4	5.91	7.19	15.7	9.85
5	5.8	6.33	10.54	8.48
6	4.28	5.22	8.32	5.48





รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไรซ์เซชันของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคอนกรีตไม่ใช้กระแสไฟฟ้าแรง



รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ของความต้านทานโพลาไรซ์เซชันของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคอนกรีตใช้กระแสไฟฟ้าแรง

จากผลการทดสอบค่าอัตราการเกิดสนิมของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดคอนกรีตควมและคอนกรีตที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์โดยนำค่าที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับค่าอัตราการเกิดสนิมตามตารางที่ 4-5 โดยมีเงื่อนไขขอบเขตการวิจัยของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กถูกจำลองให้อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเลได้ถูกกำหนดให้มีส่วนผสมของปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 0% 5% 3% และ 15% ของน้ำหนักซีเมนต์ตามลำดับ

ตารางที่ 4-5 กระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม เปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

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

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

จากผลการทดสอบที่คำนวณหาอัตราการเกิดสนิมของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้เงื่อนไขตัวอย่างอยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเลโดยการแปรผันส่วนผสมของปริมาณคลอไรด์

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

เวลา (สัปดาห์)	ค่า i_{corr} บริเวณจุดมุมของเหล็กเสริม ($\mu A/cm^2$)			
	Control	5% Cl^-	3% Cl^-	15% Cl^-
0	1.09	1.81	2.21	0.58
1	1.53	1.73	2.66	0.89
2	1.73	1.88	2.99	1.77
3	1.83	1.93	3.83	2.56
4	1.91	2.38	3.93	2.99
5	2.32	2.88	4.01	3.73
6	2.52	3.45	4.58	4.06



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

เวลา (สัปดาห์)	ค่า i_{corr} บริเวณจุดมุมของเหล็กเสริม ($\mu A/cm^2$)			
	Control	5% Cl^-	10% Cl^-	15% Cl^-
0	1.22	1.72	2.95	1.44
1	2.35	2.21	2.98	1.71
2	2.13	3.45	3.66	2.66
3	3.92	4.55	4.35	2.77
4	4.45	5.78	4.79	3.69
5	5.45	6.27	5.64	4.78
6	5.89	8.17	6.01	5.58

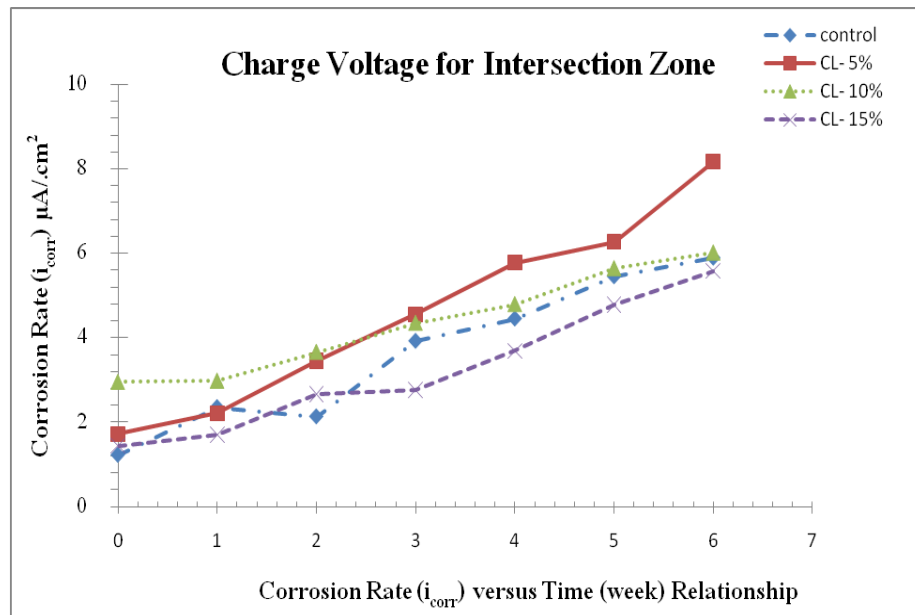
ผลการทดสอบวัดค่าจากตัวอย่างแผ่นคอนกรีตเสริม จากตัวอย่างที่สภาวะแตกต่างกันและคำนวณได้ค่าอัตราการการเกิดสนิมของเหล็กเสริมพบว่าค่าอัตราการเกิดสนิมมีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าของความต้านทานโพลาไรท์เซชันที่ได้มาจากการวัดด้วยคลื่นสัญญาณไฟฟ้าและจากความสัมพันธ์ระหว่างสภาพสิ่งแวดล้อมของตัวอย่างที่มีความ

แตกต่างกันพบว่าตัวอย่างคอนกรีตควบคุมให้ค่าอัตราการเกิดสนิมต่ำที่สุด

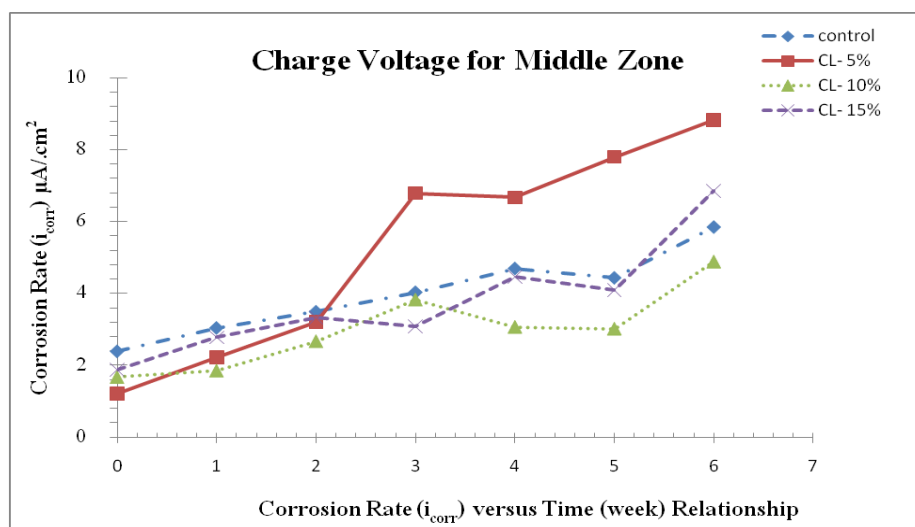
อย่างไรก็ตามค่าอัตราการเกิดสนิมที่คำนวณได้มีค่าไม่สม่ำเสมอเนื่องจากปัจจัยที่หลากหลายดังเช่นสภาพแวดล้อมในขณะทดสอบจะมีผลต่อการบันทึกค่าเช่น ปริมาณความชื้นในคอนกรีต อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน และเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าเช่น เครื่องที่ใช้วัดค่าต้องมีความละเอียดสูงและการใช้คลื่นสามารถแก้ปัญหาได้ดีกว่าการส่งสัญญาณแรงดันและกระแสแบบตรงเข้าสู่คอนกรีตเสริมเหล็ก เพราะค่าความต้านทานของคอนกรีตและเหล็กเสริมมีค่าต่ำมากการวัดค่าแต่ละครั้งต้องวัดที่เดียวทั้งระบบซึ่งมีความยุ่งยากซับซ้อนโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ที่ใช้เป็นสื่อ Probe เพื่อส่งสัญญาณผ่านคอนกรีต ซึ่งจะได้ชัดเจนว่าการไหลของกระแสไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าไปยังผิวเหล็กเสริมซึ่งเป็นการส่งสัญญาณในลักษณะที่ไม่มีการจำกัดขอบเขตของกระแสไฟฟ้าให้อยู่ภายใต้ขั้วไฟฟ้าส่งผลให้กระแส ไฟฟ้าแพร่กระจายเกินออกไปทางด้านข้างซึ่งเป็นเรื่องที่ไม่ทราบโดยเฉพาะเหล็กเสริมที่มีที่ขนาดกว้างมาก (S. Feliu, J.A. Gonzalez, C. Andrade., et al., 1988) เป็นเหตุให้ได้ผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้องเพราะว่าพื้นผิวของเหล็กเสริมบริเวณที่โพลาไรท์ (Polarized) ไม่ถูกต้องซึ่งทำให้การคำนวณค่าความหนาแน่นเกิดการผิดพลาด การใช้คลื่นสัญญาณในการวัดในครั้งนี้ ปัจจัยที่หลากหลายดังเช่น



สภาพแวดล้อมในขณะทดสอบจะมีผลต่อการบันทึกค่าได้น้อยลง และสามารถวัดค่าได้อย่างสอดคล้องและถูกต้องตามหลักการยิ่งขึ้น



รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคอนกรีตที่ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าแรง



รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในแผ่นคอนกรีตที่ไม่ใช้กระแสไฟฟ้าแรง

4.3 บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

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

จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตตัวอย่างที่มีเปอร์เซ็นต์ของคลอไรด์มากกว่าจะมีโอกาสเกิดที่เหล็กเสริมเกิดสนิมมากกว่าโครงสร้างคอนกรีตที่มีคลอไรด์ปนเปื้อนอยู่น้อยกว่า เมื่อพิจารณาด้วยเงื่อนไขที่เร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้าก็จะทำให้ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าติดลบสูงมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่ได้มีการเร่งด้วยกระแสไฟฟ้า อย่างไรก็ตามค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสามารถบอกความเป็นไปได้ของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมแต่ไม่ได้บอกสถานะในปัจจุบันว่ามีสนิมมากน้อยเพียงใดค่าที่วัดได้เป็นค่าที่สรุปในลักษณะแนวโน้มของการเกิดสนิม ซึ่งอาจเป็นค่าของการเกิดสนิมที่ไม่แท้จริง เนื่องจากอาจมีผลกระทบต่อบัจจัยที่หลากหลาย เช่นสภาพความชื้นของคอนกรีตในขณะการทดสอบต้องควบคุมอย่างประณีตให้มีความสม่ำเสมอและผิวของโครงสร้างคอนกรีตและความหนาของคอนกรีตที่มีความต้านทานสูงจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวคอนกรีตต่ำซึ่งมีผลทำให้การประเมินแนวโน้มของการเกิดสนิมมีความผิดพลาด หลังจากได้ทำการสร้างเครื่องมือวัดโดยใช้หลักการการจ่ายคลื่นสัญญาณไฟฟ้าแทนการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าไปโดยตรงเพื่อทำการหาค่าโพลาไรซ์แล้วพบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับวิธีแบบครึ่งเซลล์มาตรฐาน ผลที่ได้เป็นไปในทางเดียวกัน และสามารถวัดค่าอัตราการกัดกร่อนสอดคล้องกันตามผลการทดลองโดยเมื่อนำค่าที่ค่าความต้านทานโพลาไรซ์ที่วัดได้จากหลักการของคลื่นสัญญาณไฟฟ้าเข้าที่แผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กมาพิจารณาค่าความต้านทานโพลาไรซ์ของแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่าค่าของความต้านทานโพลาไรซ์ที่มีค่าสอดคล้องกับระยะเวลาและอัตราการเกิดสนิมเหล็ก ตามสภาวะจำลอง

4.4 ข้อเสนอแนะ

6.4.1 การวัดค่าคลื่นสัญญาณไฟฟ้ายังมีข้อจำกัดที่อาจจะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดได้ การเลือกส่งความถี่คลื่นที่ไม่เหมาะสมยังเป็นปัจจัยในการวัด และโปรแกรมที่สร้างขึ้นยังต้องมีการปรับแก้ให้ผู้ใช้เกิดความสะดวกมากขึ้น

6.4.2 การใช้หาวัดสัญญาณแบบคลื่นสามารถลดปัจจัยภายนอกในการวัดได้ดีกว่าแบบโดยตรงกับคอนกรีต แต่คุณลักษณะของหาวัดยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการปรับจูน และความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณ ดังนั้นจึงควรมีการพัฒนาตัวตรวจวัดและระบบการควบคุมในลักษณะอื่นๆต่อไป



บรรณานุกรม

1. วิศวกร วงศ์คำจันทร์ วันชัย ยอดสุดใจ และสุวิมล สัจจวานิชย์. ศูนย์วัสดุและโครงสร้าง ภาค
2. วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ “โยธาสาร วิศวกรรมสารแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์” ปีที่ 22 ฉบับที่ 4 กค.-สค. 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 Resea_h Program."
7. Babskow, A. "Some Achievements in the Field of Logging and Processing the Focused Resistivity Logs." Revie 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. Tolnlai 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." Weritoffe 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. Escudero, 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. Guyod, 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. Efid. "Electrochemical Corrosion Measurements in Crude Oil." *Corrosion* 43 No. 8 (1987): 476.
26. Jasinski, R.L, and K.D. Efid. "Electrochemical 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. Scalon. 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. Brngey, 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 yon Stab1in 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. Shimozaawa. 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 ก

ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคอนกรีต

ตารางภาคผนวกที่ ก1 ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิมของแผ่นคอนกรีตเสริม

Time (week)	RP for Intersection Zone ($k.\Omega, cm^2$)			
	control	CL ⁻ 5%	CL ⁻ 10%	CL ⁻ 15%
0	18.3	34.5	23.55	43.3
1	17.06	33.29	21.31	40.2
2	16.6	30.48	18.59	33.02
3	11.14	15.2	15.1	15.36
4	9.28	14.8	14.2	13.41
5	8.56	13.8	13.35	8.05
6	5.29	10.5	8.16	5.41

ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม

RP for Intersection Zone ($k.\Omega, cm^2$)			
control	CL ⁻ 5%	CL ⁻ 10%	CL ⁻ 15%
8.02	10.66	26.36	15.56
7.23	9.76	24.33	14.58
6.5	9.34	21.32	11.76
6.23	8.26	18.14	10.78
5.91	7.19	15.7	9.85
5.8	6.33	10.54	8.48
4.28	5.22	8.32	5.48

ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม



ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม

Corrosion Rate for Intersection Zone($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			
control	CL ⁻ 5%	CL ⁻ 10%	CL ⁻ 15%
1.22	1.72	2.95	1.44
2.35	2.21	2.98	1.71
2.13	3.45	3.66	2.66
3.92	4.55	4.35	2.77
4.45	5.78	4.79	3.69
5.45	6.27	5.64	4.78
5.89	8.17	6.01	5.58

ค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดสนิมและกระแสไฟฟ้าการเกิดสนิม

	Time (weeks)						
	0	1	2	3	4	5	6
Control	-555.72	-548.72	-542.8	-533.32	-532.20	-508	-457
5% Cl ⁻	-685.05	-657.00	-636.4	-613.2	-601.00	-511.3	-481
10% Cl ⁻	-772.30	-747.40	-642.2	-656.24	-581.00	-583.88	-550
15% Cl ⁻	-781.20	-772.20	-676.4	-663.36	-558.80	-549	-474



ภาคผนวก ข

คุณสมบัติและการตั้งค่าอุปกรณ์

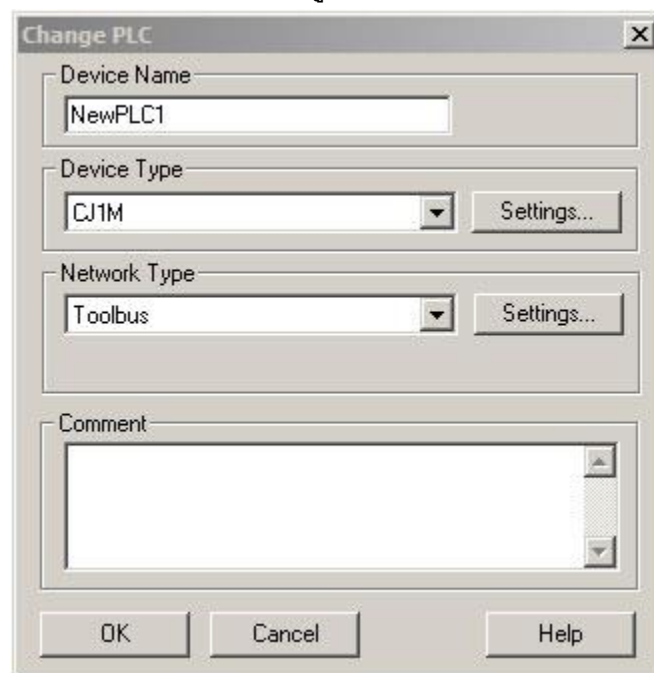
การตั้งค่าการสื่อสารในส่วนของโปรแกรมเชื่อมต่อระหว่าง PLC กับจอสั่งการ

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

การตั้งค่าการสื่อสารในส่วนของพีแอลซี

ขั้นตอนในการตั้งค่าการสื่อสารของตัวพีแอลซีนั้นจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

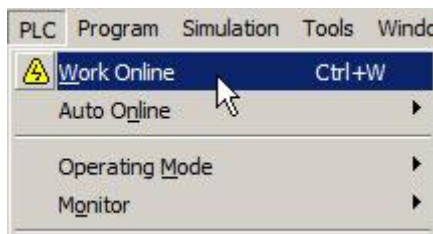
ทำการสร้าง New Project ขึ้นมาใหม่ โดยเข้าไปที่เมนู “File > New” จะปรากฏหน้าต่าง “Change PLC” ขึ้นมา ดังรูปที่ที่ 1



รูปที่ที่ 1 หน้าต่าง Change PLC

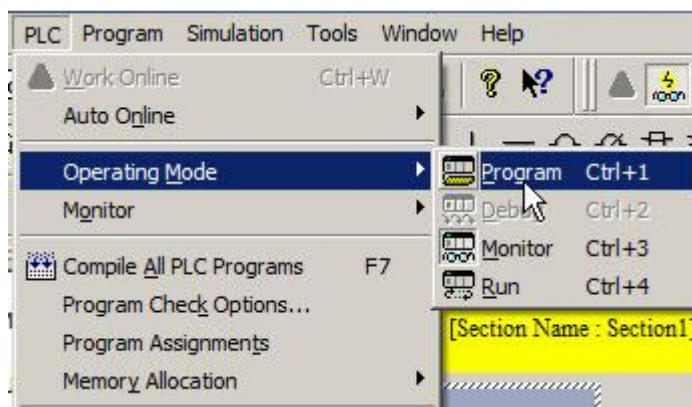
จากรูปที่ที่ 1 ให้เลือกรุ่นของพีแอลซีในส่วนของ “Device Type” ให้ตรงกับพีแอลซีที่ทางผู้ใช้งานใช้จริง ในที่นี้ ผู้เขียนจะเลือกเป็นรุ่น CQM1H-CPU21 ส่วนการตั้งค่า “Network Type” นั้นจะขึ้นอยู่กับวิธีการเชื่อมต่อสายสัญญาณระหว่างตัวคอมพิวเตอร์กับพอร์ตสื่อสารของตัวพีแอลซี โดยหากเชื่อมต่อสายสัญญาณเข้ากับ Port RS-232C (DB9 PIN) บนตัวของซีพียูให้เลือก “Network Type” เป็น “SYSMAC WAY” แต่หากเชื่อมต่อสายสัญญาณเข้ากับ “Peripheral Port” ให้เลือก “Network Type” เป็น “Tool Bus” เมื่อตั้งค่าเรียบร้อยแล้วก็ให้คลิกเลือก “OK”

หลังจากที่ได้โปรแกรมใหม่มาแล้วให้ทำการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์เข้ากับตัวพีแอลซีโดยเข้าไปที่เมนูพีแอลซีแล้วเลือก “Work Online” ดังรูปที่ 2



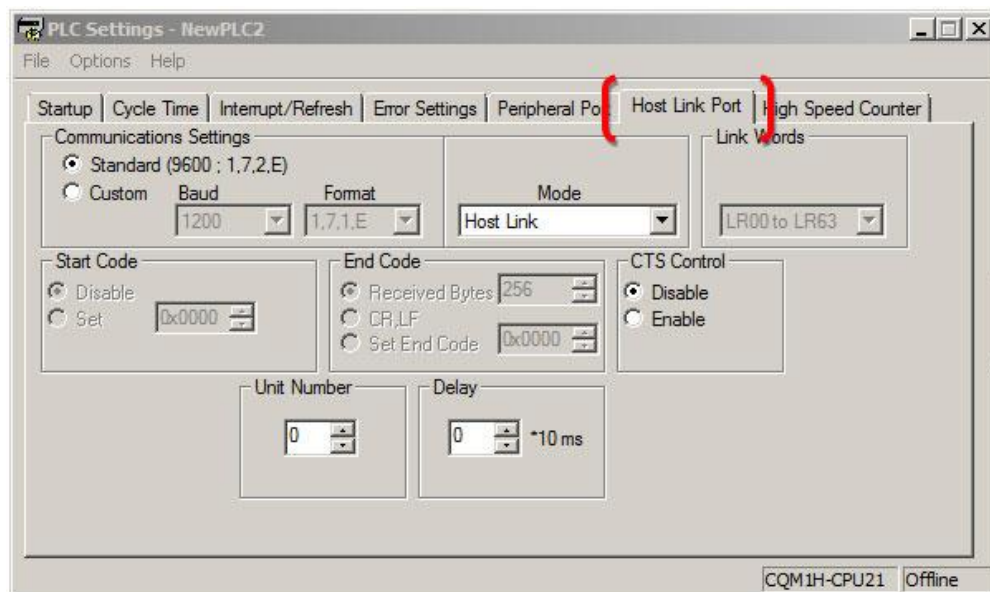
รูปที่ 2 การเชื่อมต่อ CX-Programmer เข้ากับตัวพีแอลซี (Work Online)

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



รูปที่ 3 การเปลี่ยนโหมดการทำงานของตัวพีแอลซี

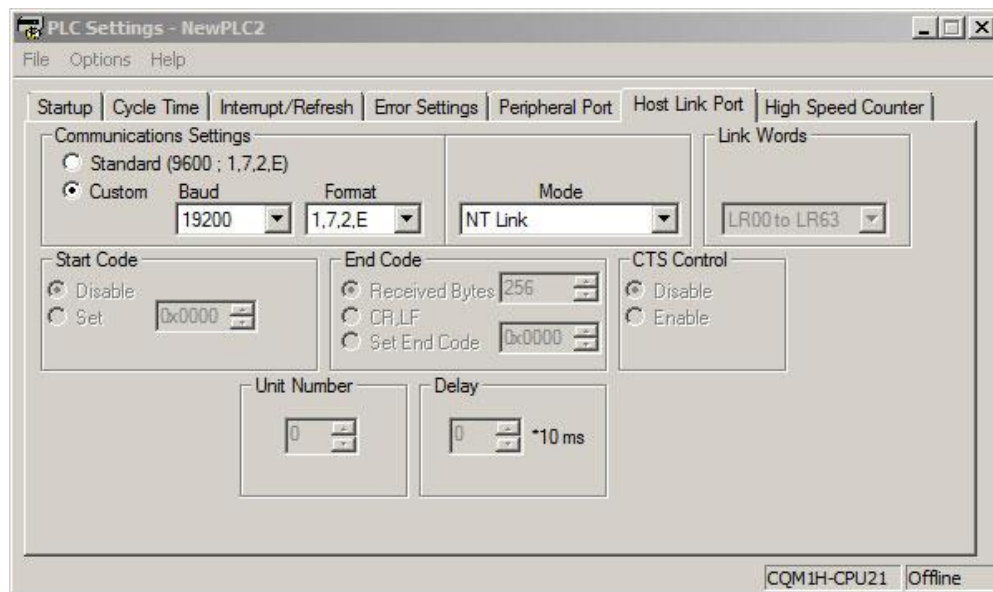
จากนั้นเปิดหน้าต่าง “PLC Setting” โดยเข้าไปที่เมนู PLC > Edit > Setting จะปรากฏหน้าต่าง “PLC Setting” ขึ้นมา ในหน้าต่าง “PLC Setting” ให้คลิกเลือกที่แท็บ “Host Link Port” ดังรูปที่ 4



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



รูปที่ที่ 5 การตั้งค่าโหมดการสื่อสาร และความเร็วในการรับส่งข้อมูลร่วมกับ Touch Screen สำหรับพีแอลซีรุ่น CQM1H

จากนั้นเมื่อตั้งค่าเรียบร้อยแล้วให้เข้าไปที่เมนู “Option” ในหน้าต่าง “PLC Setting” แล้วเลือก “Transfer to PLC” เนื่องจากขณะ Transfer จะไม่มีหน้าต่างแสดงสถานการณ์การ Transfer จะสังเกตเห็นแค่เมาท์เป็นรูปที่นาฬิกาทราย หากต้องการยืนยันว่าการ Transfer เสร็จสมบูรณ์สามารถตรวจสอบได้โดยเข้าไปที่เมนู “Option” แล้วเลือก “Verify” หากการ Transfer เสร็จสมบูรณ์จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ที่6 แต่หากการ Transfer ไม่สมบูรณ์จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ที่ 7

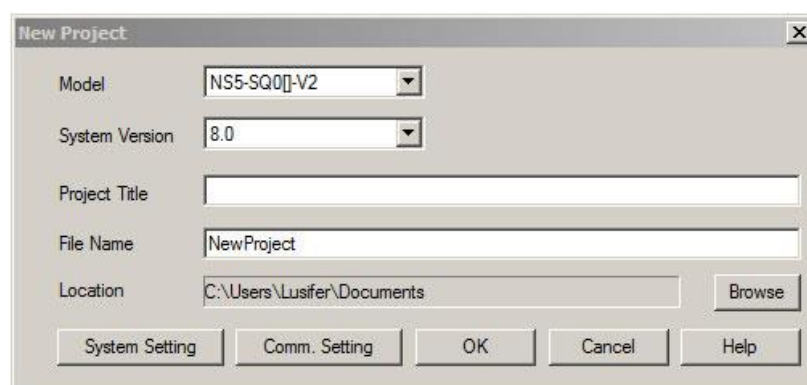


รูปที่ที่ 6 “Verify” เสร็จสมบูรณ์ รูปที่ที่ 7 “Verify” ไม่สมบูรณ์

เมื่อ Verify เสร็จสมบูรณ์แล้วให้หยุดการเชื่อมต่อระหว่างพีแอลซีและ Computer โดยเข้าที่เมนู “PLC > Work Online” จากนั้นปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้าของตัวพีแอลซีแล้วตั้งค่า Dip SW ขา 5 ไปยังตำแหน่ง OFF แล้วเปิดใหม่เนื่องจากค่าต่างๆ ที่ตั้งค่าผ่านทางหน้าต่าง PLC Setting จะมีผลก็ต่อเมื่อปิดแหล่งจ่ายของตัวพีแอลซีแล้วเปิดใหม่

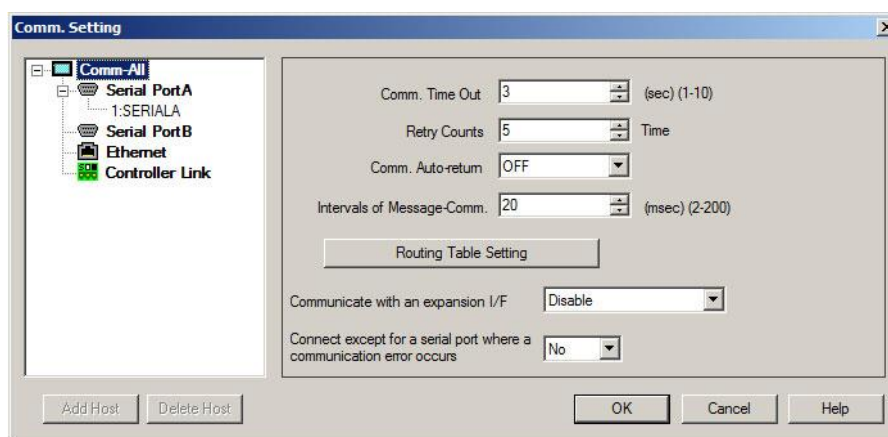
การตั้งค่าการสื่อสารในส่วนของหน้าจอ Touch Screen

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



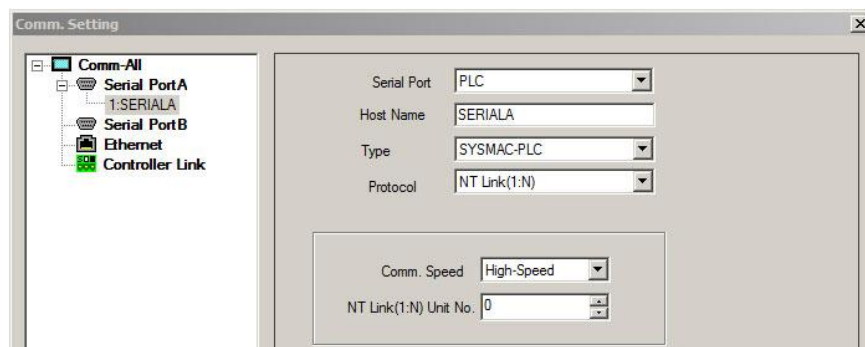
รูปที่ที่ 8 หน้าต่าง “New Project” สำหรับหน้าจอ Touch Screen

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



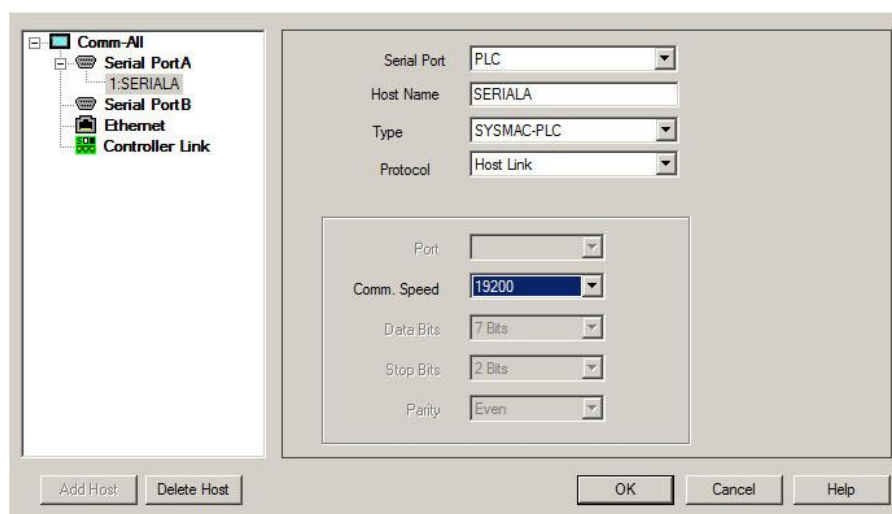
รูปที่ที่ 9 หน้าต่าง “Comm. Setting”

จากนั้นให้คลิกเลือกที่ “1: SERIALA” จะได้หน้าต่างดังรูปที่ที่ 10



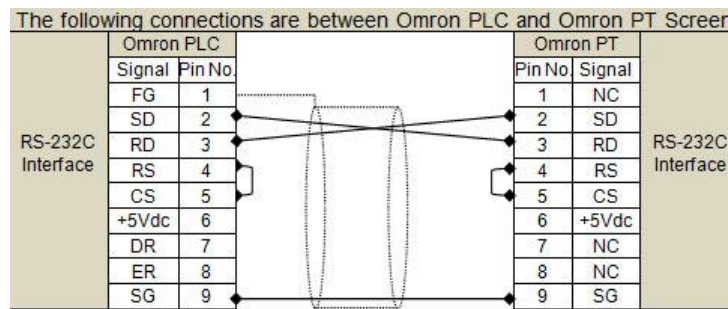
รูปที่ที่ 10 หน้าต่างเมื่อคลิกเลือก“1: SERIALA”

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



รูปที่ที่ 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 จะเป็นไปตามรูปที่ที่ 12

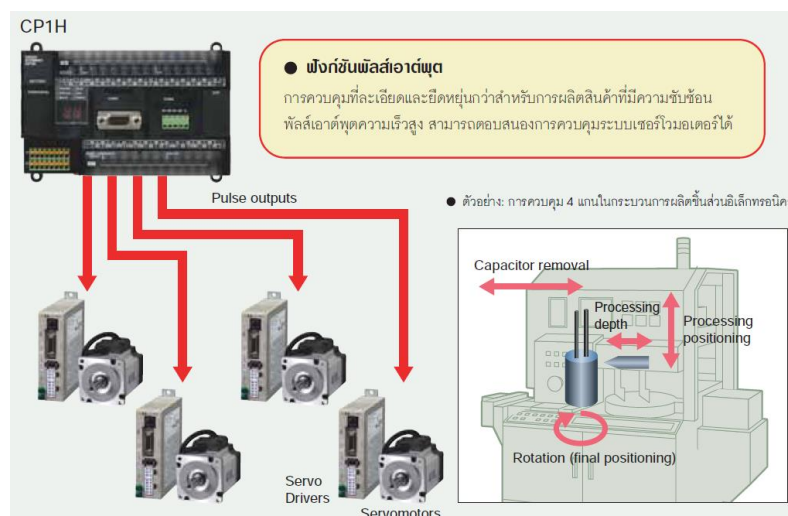


รูปที่ที่ 12 การเดินสายสัญญาณระหว่าง Omron PLC กับ Omron Touch Screen

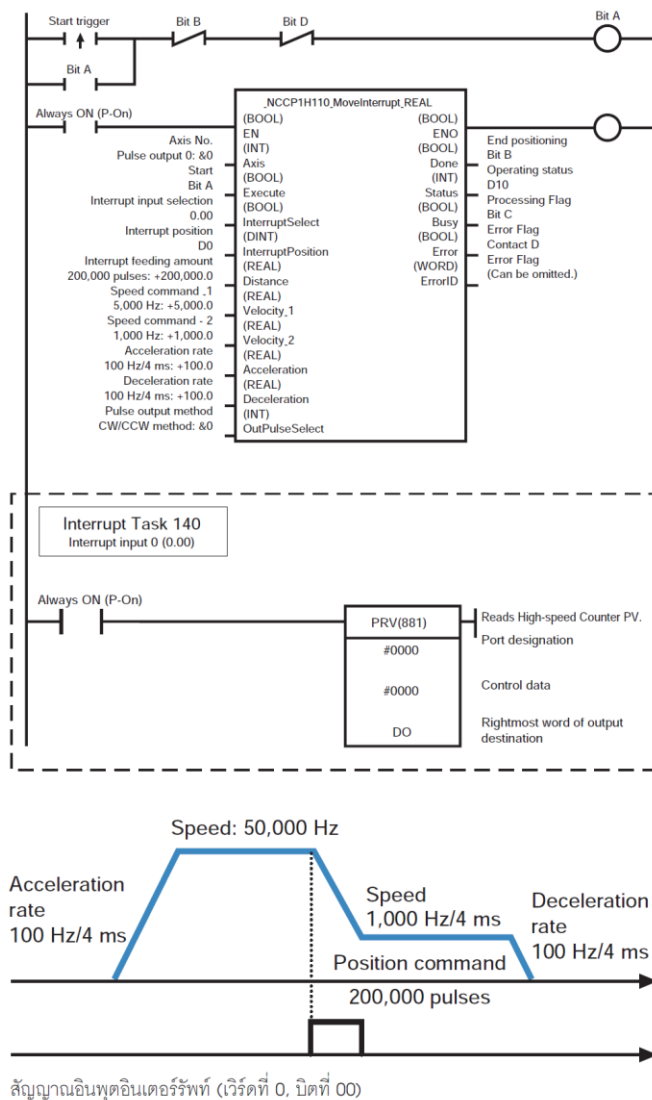
หากทำการเชื่อมต่อได้จะปรากฏ Screen Data หน้าแรกที่ผู้ใช้งานได้สร้างไว้บนหน้าจอของตัว Touch Screen แต่หากเชื่อมต่อไม่ได้จะขึ้นข้อความ “Connecting...” ตรงมุมขวาด้านล่างของหน้าจอ Touch Screen

ข. 13 อุปกรณ์ควบคุม

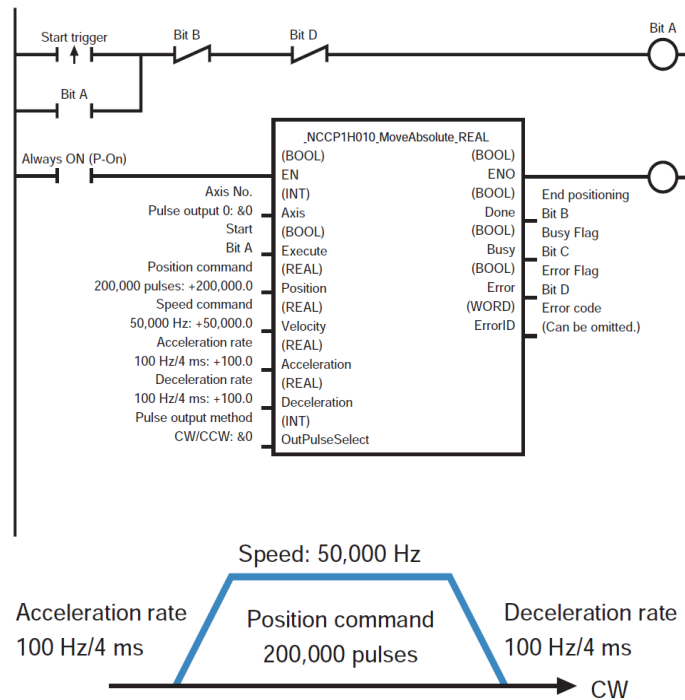
ข 13.1 โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์



● การใช้งาน FB สำหรับงาน Interrupt Feeding

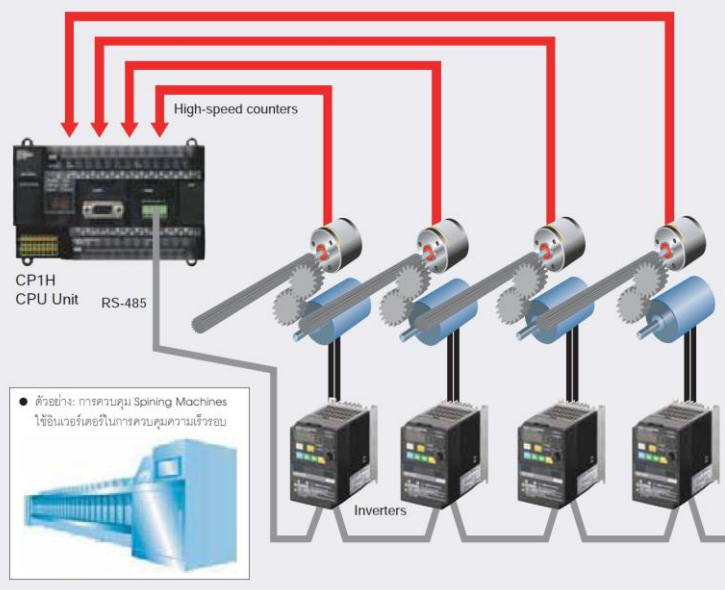


● ตัวอย่าง: การใช้งาน FB สำหรับงานควบคุมตำแหน่ง



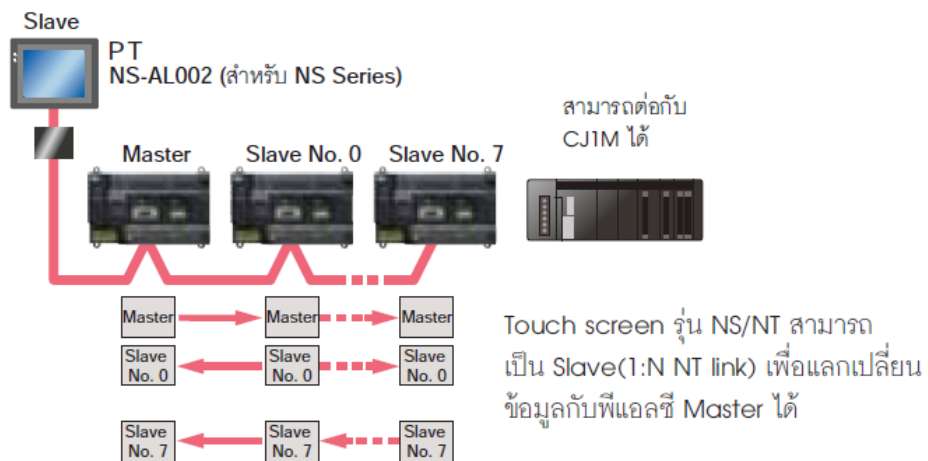
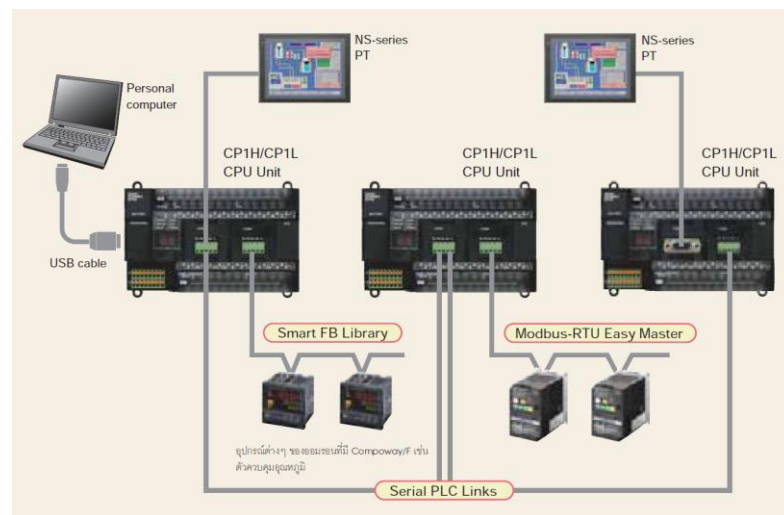
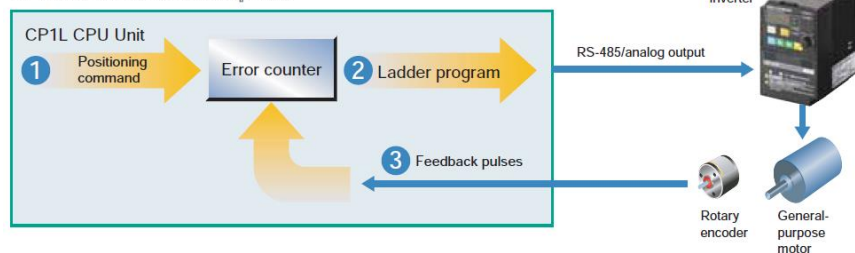
● ฟังก์ชันเคาน์เตอร์ 4 เฟส (Single-phase หรือ Differential Phases)

ข้อมูลจากเคาน์เตอร์อินพุตถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการควบคุมตำแหน่ง โดยใช้อินเวอร์เตอร์ได้ เช่น ในงานควบคุม Spindle ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ



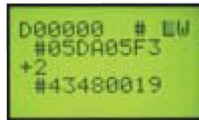
■ ฟังก์ชัน Inverter Positioning

CP1L มีฟังก์ชัน error counter อยู่ภายใน



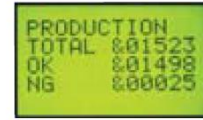
แสดงผลและตั้งค่าข้อมูล

แสดงผลและแก้ไขข้อมูลในหน่วยความจำต่างๆ ของ PLC ได้ โดยไม่ต้องต่อคอมพิวเตอร์ ทำให้การปรับแต่ง สามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว เช่น ค่าไทม์เมอร์



แสดงข้อความ

สามารถแสดงข้อความที่เป็นตัวอักษรยาวถึง 48 ตัวต่อหนึ่งข้อความ ทำให้สามารถแสดงผลรายงานการผลิตหรือการสื่อสารอื่นๆ กับผู้ใช้งาน โดยไม่จำเป็นต้องใช้จอสีจอสกร สำหรับงานที่มีขนาดเล็กๆ



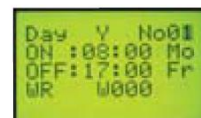
แสดงสถานะข้อผิดพลาด

แสงแบคไลต์จะเปลี่ยนเป็นสีแดงทันทีที่เกิด Error ขึ้นกับ PLC พร้อมทั้งแสดงสถานะของ Error พร้อมรายละเอียดต่างๆ เช่น วันเวลาและสาเหตุ



สมาร์ทไทม์เมอร์

เป็นฟังก์ชันเสริมที่จะช่วยให้ PLC ของคุณกลายเป็น Daily Timer, Weekly Timer โดยไม่ต้องเขียนโปรแกรมแลดเดอร์ 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 (**)

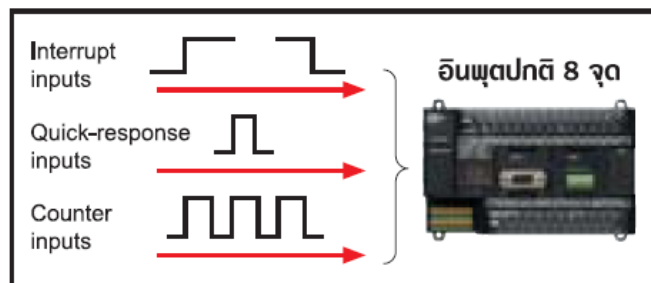
● Numerical Functions

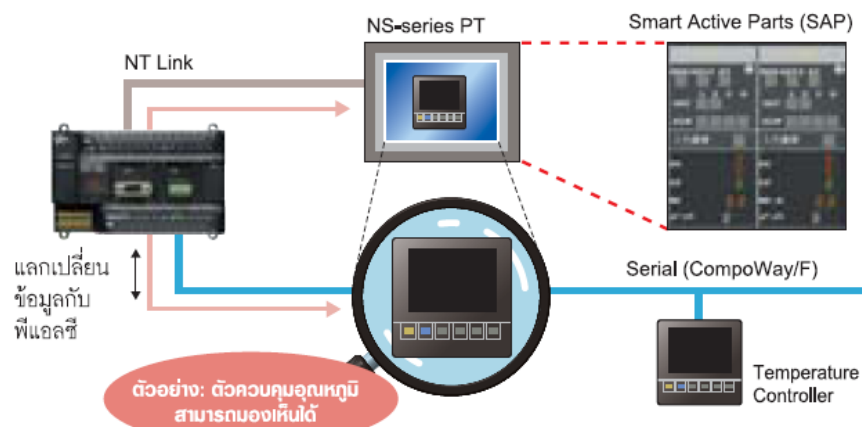
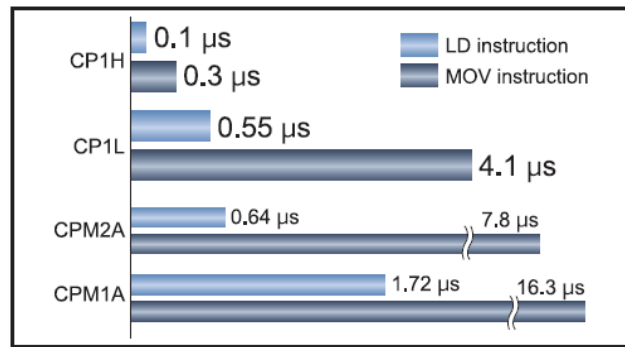
ABS, SQRT, LN, LOG, EXP, SIN, COS, TAN, ASIN, ACOS,

ATAN, EXPT

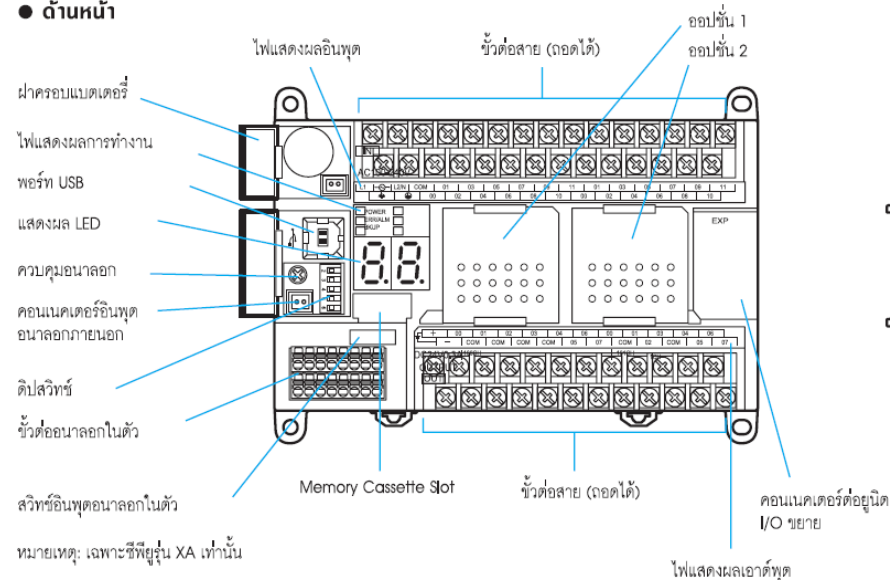
● Arithmetic Functions

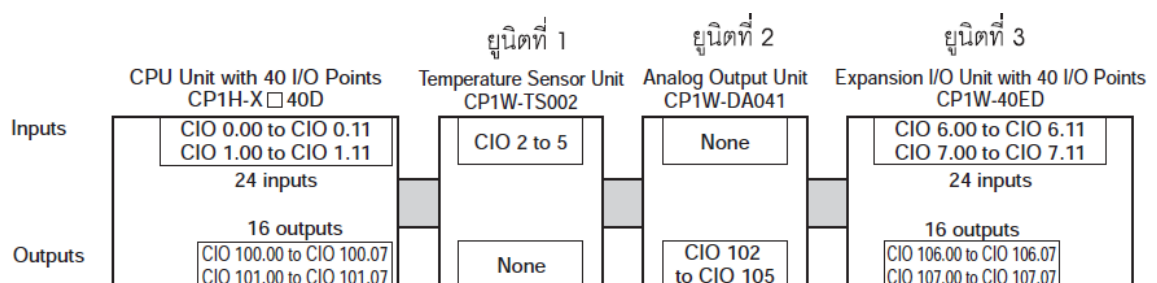
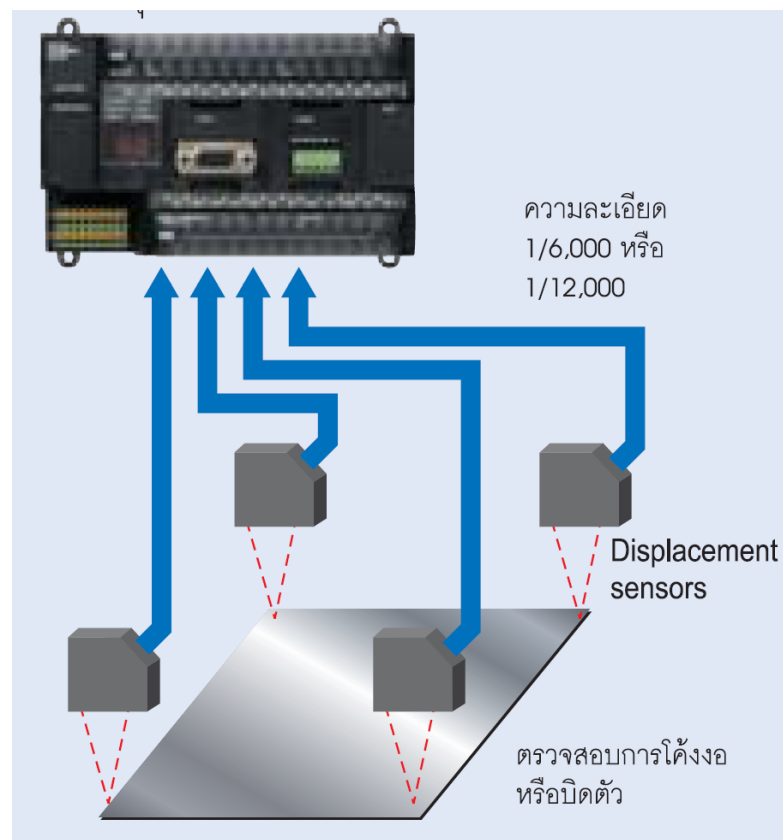
Exponentiation (EXPT)





● ด้านหน้า





● CP1L (30 จุด)

· AC Power Supply Models

L1	L2/N	COM	01	03	05	07	09	11	01	03	05	
			00	02	04	06	08	10	00	02	04	NC
Inputs (CIO 0)						Inputs (CIO 1)						

Inputs (CIO 0)

Inputs (CIO 1)

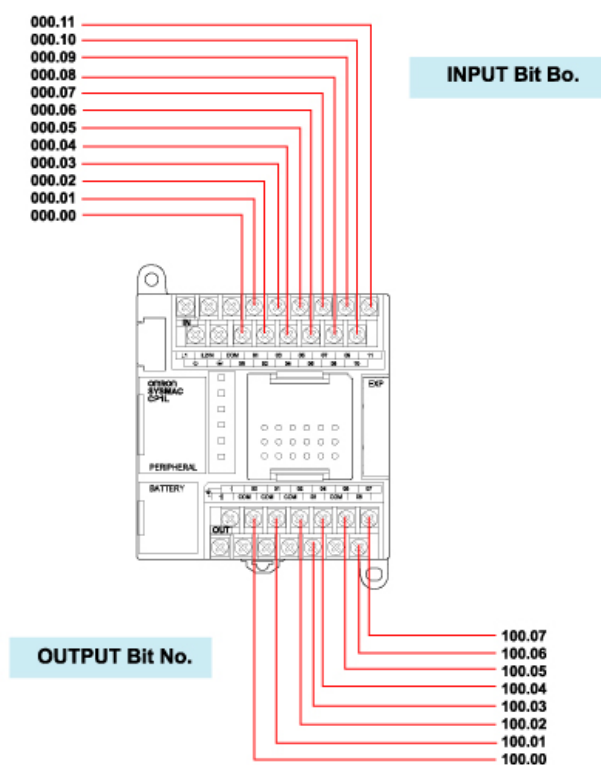
· DC Power Supply Models

+	-	COM	01	03	05	07	09	11	01	03	05
			00	02	04	06	08	10	00	02	04
Inputs (CIO 0)						Inputs (CIO 1)					

Inputs (CIO 0)

Inputs (CIO 1)

ข 13.2 ระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ควบคุม



ข 13.3 ระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ควบคุม

รุ่น	CP1L-L20		CP1L-M30		CP1L-M40		ชื่อรุ่น Expansion
จำนวน I/O บนตัว CPU	IN	OUT	IN	OUT	IN	OUT	-
	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



เครื่องมือวัดค่าโพลาไรซ์เซชัน

ภาคผนวก ง

โปรแกรม Automation engineering tool

