

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างทางกายภาพคอนกรีต

โครงสร้างคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบมาจากวัสดุหลายชนิดด้วยกัน (Heterogeneous) ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์พฤติกรรมของคอนกรีตให้แม่นยำจึงเป็นเรื่องที่เป็นไปได้ยากมาก อย่างไรก็ตามหากพิจารณาในระดับมหภาค (Macroscopic Level)^[12-13] จะพบว่ามีส่วนประกอบที่ไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกันซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ มีมวลรวมซึ่งกระจายอย่างสม่ำเสมออยู่ในไฮเดรทซีเมนต์เพสต์ (Hydrated Cement Paste) แต่ถ้าพิจารณาโครงสร้างคอนกรีตในระดับจุลภาค (Microscopic Level) จะสามารถแบ่งแยกได้เป็น 3 ส่วนได้แก่มวลรวมไฮเดรทซีเมนต์เพสต์ และผิวสัมผัสส่วนที่เชื่อมต่อกันระหว่างผิวของมวลรวมกับไฮเดรทซีเมนต์เพสต์หรือเรียกว่าทรานซิชันโซน (Transition Zone) ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆหนาประมาณ 10 ถึง 50 ไมครอน เคลือบรอบๆ ผิวของมวลรวม^[12-13] โดยส่วนที่เป็นทรานซิชันโซนนี้จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันตลอดเวลาซึ่งส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างทางกายภาพของคอนกรีตอันได้แก่ความทนทานต่อสภาพแวดล้อม และความสามารถในการซึมผ่านได้

โครงสร้างของไฮเดรทซีเมนต์เพสต์ พบว่าที่จุดหนึ่งๆของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันพบว่าโครงสร้างของไฮเดรทซีเมนต์เพสต์จะประกอบด้วยเจลหรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท ผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ อนุภาคซีเมนต์ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา (Unhydrated Cement) และช่องว่าง (Space) ที่มีน้ำอยู่ภายในซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปน้ำเหล่านี้จะถูกดึงมาใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันภายในเจลจะประกอบด้วยกลุ่มของอนุภาคโดยจะมีช่องว่างระหว่างอนุภาคเจลซึ่งเรียกว่า โพรงเจล (Gel Pore)

จากการศึกษาเกี่ยวกับโพรงของคอนกรีต สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

2.1.1 โพรงเจล (Gel Pore) หมายถึง โพรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของไฮเดรทซีเมนต์เพสต์ดังที่กล่าวมาแล้ว ในช่วงแรก Powers^[34] สันนิษฐานว่าโพรงชนิดนี้มีขนาด 18 อังสตรอม แต่ภายหลัง Feldman และ Sereda^[35] พบว่ามีขนาดประมาณ 5 ถึง 25 อังสตรอม จากการศึกษาพบว่าโพรงเจลเหล่านี้มิได้มีผลกระทบโดยตรงต่อคุณสมบัติด้านการซึมผ่านของน้ำที่จะเคลื่อนที่ผ่านโพรงภายในเนื้อคอนกรีต เนื่องจากขนาดของโพรงที่จะส่งผลให้การซึมผ่านของน้ำเกิดขึ้นได้นั้น ต้องมีรัศมีไม่น้อยกว่า 500 อังสตรอม^[14-17]

2.1.2 โพรงแคพพิลลารี (Capillary Pore) หมายถึง โพรงคอนกรีตที่อยู่ในประกอบด้วยน้ำซึ่งพร้อมที่จะถูกดึงเพื่อนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นโพรงคอนกรีตที่เป็นที่ว่างเหล่านี้จึงยังไม่ถูกอุดรูหรือถูกเติมเต็มโดยไฮเดรทซีเมนต์เฟสด้วยเหตุนี้ปริมาตรและขนาดของโพรงแคพพิลลารีจึงขึ้นอยู่กับระยะห่างของอนุภาคซีเมนต์ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาในคอนกรีตสด และระดับของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Degree of Hydration)^[18-19] นอกจากนี้ยังพบว่าโพรงแคพพิลลารีนั้นมีขนาดใหญ่กว่าโพรงเจลมากและเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อความสามารถในการซึมผ่านได้ของคอนกรีต ในกรณีซีเมนต์เฟสที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงแคพพิลลารีจะมีขนาดเล็กอยู่ประมาณ 0.01 ถึง 0.05 ไมครอน เท่านั้น แต่ในกรณีที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าสูงพบว่าโพรงแคพพิลลารีจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงถึงประมาณ 0.30 ถึง 0.50 ไมครอน^[15] แต่โดยทั่วไปหากกล่าวถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงแคพพิลลารี มักหมายถึง โพรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.01 ถึง 10 ไมครอน และจากการศึกษาพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงแคพพิลลารีที่มีผลต่อความสามารถในการซึมผ่านได้นั้น พบว่าขนาดอยู่ระหว่าง 0.12 ถึง 0.16 ไมครอน

2.1.3 ฟองอากาศ (Air Void or Entrapped Air) หมายถึง ฟองอากาศที่ถูกกักเก็บไว้ในคอนกรีตระหว่างการหล่อทิ้งที่เกิดจากความตั้งใจและไม่ได้ตั้งใจ โดยทั่วไปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศที่เกิดขึ้น อาจจะมีขนาดใหญ่ถึง 3 มิลลิเมตร และหากมีการใส่สารกักฟองอากาศจะทำให้ฟองอากาศนั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 ถึง 200 ไมครอน ฟองอากาศส่งผลต่อความสามารถซึมผ่านได้ของคอนกรีตมาก โดยทั่วไปฟองอากาศ มักหมายถึง โพรงที่มีขนาดใหญ่กว่าโพรงแคพพิลลารี นั่นคือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 10 ไมครอน

โครงสร้างของทรานซิชันโซน (Transition Zone) มีลักษณะเป็นผลึกขนาดใหญ่ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิโพลูมิเนต^[20] และมักพบว่าบริเวณรอบๆมวลรวมนั้นมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นไปกว่าบริเวณอื่นๆ ทำให้บริเวณนี้มีลักษณะคล้ายเป็นฟิล์มน้ำเคลือบผิวมวลรวม ส่งผลให้บริเวณนี้มีความพรุนและมีคุณสมบัติด้านการซึมผ่านที่สูงกว่าบริเวณอื่นๆอีกด้วย ด้วยเหตุนี้เองทำให้ขนาดของโพรงแคพพิลลารีที่อยู่ใกล้กับบริเวณรอบๆมวลรวมนั้นจะมักมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและทำให้คอนกรีตบริเวณนั้นมีความพรุนเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลทำให้คอนกรีตในบริเวณนั้นมีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านได้ต่ำลง และทำให้คุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตลดลงไปด้วย

2.2 กลไกการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

กลไกการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีตนั้นมีการสรุปออกมาได้ 3 กลไก ดังต่อไปนี้

2.2.1 กลไกแคพพิลลารี (Capillary Adsorption) คือ เมื่อคอนกรีตมีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่มีสภาวะที่มีคลอไรด์ เช่น น้ำทะเล เป็นต้น ซึ่งเป็นไปได้ว่าโครงสร้างคอนกรีตอาจจะเผชิญสภาวะของการเกิดเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying Process) เมื่อของเหลวในที่นี้คือสารละลายที่มีเกลือของคลอไรด์เกิดการสัมผัสกับผิวคอนกรีตที่แห้ง จะถูกดูดซึมเข้าสู่ภายในโพรงคอนกรีตภายในโดยแรงตึงผิว (Capillary Suction) การดูดซึมมักจะเกิดการเคลื่อนที่เมื่อความแตกต่างของความชื้นเกิดขึ้น โดยจะเคลื่อนที่จากจุดที่มีความชื้นมากไปยังจุดที่มีความชื้นน้อยกว่า โดยทั่วไปกลไกการซึมผ่านของคลอไรด์ด้วยการดูดซึม (Capillary Adsorption) จะมีความลึกเพียงเล็กน้อยแต่เกิดขึ้นได้รวดเร็ว คลอไรด์ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าถึงระดับเหล็กเสริมได้ด้วยกลไกนี้โดยตรงยกเว้นคอนกรีตที่ใช้มีคุณภาพที่ต่ำ หรือเหล็กเสริมมีระยะหุ้มน้อย แต่ที่สำคัญมาก คือ กลไกนี้ส่งเสริมกลไกการแพร่ (Diffusion) ของคลอไรด์เข้าสู่เหล็กเสริมให้เกิดได้ง่ายและเร็วขึ้น

2.2.2 กลไกความดันของน้ำ (Hydrostatic Pressure) คือ การใช้ความดันของน้ำหรือสารละลายในการซึมผ่านของคลอไรด์ด้วยระดับความลึกของของเหลว (Pressure Head) ซึ่งกลไกการแพร่ของคลอไรด์ด้วยวิธีนี้มักจะเกิดในโครงสร้างคอนกรีตที่จมอยู่ในน้ำทะเลซึ่งมีความลึกมากพอสมควร โดยความสัมพันธ์ของแรงดันและระดับความลึกนี้สามารถอธิบายได้โดยการใช้สมการของดาร์ซี (Darcy's Equation or Darcy's Law)

2.2.3 กลไกการแพร่ (Diffusion) คือ วิธีที่มีความนิยมมากที่สุดในการจำลองสภาพการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ที่ซึมเข้าสู่คอนกรีต โดยใช้หลักการของการแพร่ใน 1 มิติ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคของสารจากบริเวณที่มีความเข้มข้นมากไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า ในที่นี้อธิบายด้วยกฎข้อที่ 1 ของการแพร่ หรือ Fick's First Law^[2-3] โดยเป็นการพิจารณาเมื่อความเข้มข้นเป็นฟังก์ชันของระยะทางเพียงอย่างเดียวโดยไม่ขึ้นกับเวลา หรือที่เรียกว่า สภาวะคงที่ (Steady State) แต่ในทางปฏิบัติการพิจารณาว่าความเข้มข้นนั้นจะคงที่เมื่อเทียบกับเวลานั้นเป็นไปได้ นั่นคือความเข้มข้นเป็นฟังก์ชันของระยะทางและเวลา หรือที่เรียกว่า สภาวะไม่คงที่ (Non-steady State) ในที่นี้อธิบายด้วยกฎข้อที่ 2 ของการแพร่ หรือ Fick's Second Law

2.3 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์ (Steel Corrosion due to Chloride)

ปัญหาหลักของโครงสร้างคอนกรีตที่ตั้งอยู่ใกล้ชายฝั่ง หรือ ริมทะเล คือ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมอันเนื่องมาจากคลอไรด์ เนื่องมาจากในน้ำทะเลมีอนุภาคของคลอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 90^[10] ซึ่งถือว่ามากกว่าอนุภาคชนิดอื่นๆ เช่น โซเดียม ซัลเฟต

แคลเซียม แมกนีเซียม ฯลฯ อย่างไรก็ตามอนุภาคของคลอไรด์เพียงอย่างเดียวนั้นไม่ได้ส่งผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็กโดยตรง แต่คลอไรด์มีคุณสมบัติในการเร่งให้เกิดสนิมได้เร็วขึ้น

จากการศึกษาปริมาณของคลอไรด์ทั้งหมดที่มีอยู่ในภายในเนื้อคอนกรีต(Total Chloride) พบว่าเป็นผลรวมของคลอไรด์สองประเภทด้วยกัน^[28] ได้แก่ ประเภทที่หนึ่งคือคลอไรด์ประเภทตรึงอยู่กับที่ (Fixed Chloride or Bound Chloride) ซึ่งถูกจับยึดอยู่ในไฮเดรทซีเมนต์เฟส และที่เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนรูปไปในรูปของสารประกอบแคลเซียมคลอโรลูมินเนตไฮเดรท (Chloro-aluminate Hydrate) ซึ่งรู้จักกันโดยทั่วไปว่าเป็นเกลือของฟรีเดล(Friedel's Salts) หรือที่ถูกดูดซับด้วยผิวของโพรงเจล(Gel Pore) และบางส่วนอาจถูกดูดซับที่ผิวของผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก โดยคุณสมบัติหลักของคลอไรด์ประเภทตรึงอยู่กับที่นี้คือไม่สามารถละลายน้ำได้ส่งผลให้คลอไรด์ที่ประเภทนี้ไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อเนื่องเข้าสู่เนื้อคอนกรีตที่อยู่ลึกเข้าไปจนถึงเหล็กเสริมได้ ส่วนคลอไรด์ประเภทที่สองคือคลอไรด์อิสระ(Free Chloride) ซึ่งสามารถละลายน้ำได้และเคลื่อนที่เข้าสู่เนื้อคอนกรีตตลอดจนถึงผิวเหล็กเสริมได้โดยอาศัยความชื้นผ่านกลไกการเคลื่อนที่ต่างๆดังที่ได้กล่าวไป อย่างไรก็ตามคลอไรด์อิสระนั้นสามารถถูกจับยึดและเปลี่ยนเป็นคลอไรด์ประเภทตรึงอยู่กับที่ได้โดยไตรแคลเซียมอลูมินเนต(C_3A) ซึ่งมีอยู่ภายในปูนซีเมนต์โดยอาศัยกระบวนการทางเคมี(Chemical Binding)^[32]

การเกิดสนิมนั้นเหล็กเป็นขบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่มีองค์ประกอบคือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าภายใน ความชื้นและออกซิเจน โดยธรรมชาติแล้วสภาวะความเป็นต่างอันเนื่องมาจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งมีค่า pH ประมาณ 12.0 -13.0 จะช่วยต้านทานการเกิดสนิมได้ดีในระดับหนึ่ง จากฟิล์มออกไซด์ของเหล็กเสริม ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) ซึ่งเป็นแผ่นบางๆซึ่ง ที่เรียกว่า Passivation Layer โดยแผ่นฟิล์มนี้ทำหน้าที่เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้ไม่ให้เกิดสนิมจากการสัมผัสกับออกซิเจนและความชื้นโดยตรง หากฟิล์มนี้ถูกทำลายลงเหล็กเสริมจะเกิดสนิมได้โดยง่ายซึ่งเราเรียกกระบวนการนี้ว่า Depassivation ซึ่งกระบวนการนี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้เมื่อสภาวะความเป็นต่างของคอนกรีตลดต่ำลงจนมีค่า pH ประมาณ 11.5 -12.0 ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากสาเหตุหลายประการด้วยกัน เช่น จากการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน จากการซึมผ่านและชะล้างสภาวะต่างด้วยน้ำ จากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก และจากการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระบางส่วนที่สามารถซึมผ่านเข้าไปจนถึงผิวของเหล็กเสริม โดยสาเหตุหลังสุดนี้พบว่าเมื่อปริมาณคลอไรด์อิสระเพิ่มขึ้นจะทำให้สภาวะความเป็นต่าง ณ จุดที่ คลอไรด์เข้าถึงเหล็กเสริมนั้นลดลงไปด้วยและหลังจากนั้นอาจจะใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่ง(Propagation Period)เพื่อเพิ่มจำนวนปริมาณคลอไรด์ให้มากขึ้นจนถึงจุดวิกฤต และหลังจากจุดวิกฤตแล้วสนิมจะมีโอกาสเกิดขึ้นทันทีได้หากมีปริมาณออกซิเจน และความชื้นที่เพียงพอ ดังนั้นการวิบัติของโครงสร้างจึงเกิดจากการที่

ปริมาณของเหล็กเสริมเกิดสนิมจะมีการขยายตัวมากขึ้นจากเดิม ทำให้เกิดการกะเทาะร่อน (Spalling) ของคอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กเสริม การจำแนกตามลักษณะของการเปิดเผยของโครงสร้างต่อสภาพแวดล้อม (Basic Exposure Zones) สามารถแบ่งได้เป็น 4 บริเวณด้วยกัน ดังรูปที่ 2.1 พบว่าในแต่ละบริเวณมีกลไกการซึมผ่านที่แตกต่างกันไป ดังนี้

2.3.1 บริเวณบรรยากาศทะเล (Marine Atmospheric Zone) ในบริเวณนี้ไม่มีการสัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรงแต่ละอองหรือไอทะเลสามารถส่งถ่ายผ่านอากาศได้ (Air Blown or Blown Spray) โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ระยะห่างของโครงสร้างจากชายฝั่งทะเลโดยระดับความเข้มข้นของคลอไรด์จะแปรผกผันกับระยะห่าง ความเร็วลม กลไกการซึมผ่านในบริเวณนี้จะ เป็นกลไกการแพร่ของไอทะเลและคลอไรด์ (Gas Diffusion) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตจำเป็นต้องใช้ความชื้นเป็นตัวกลางในการแพร่ ดังนั้นการแพร่ของไอน้ำ (Water Vapour Diffusion) จากภายนอกเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีต จึงเป็นปัจจัยอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้ภายในเนื้อคอนกรีตเกิดความชื้นและเหมาะสมต่อการการการแพร่ของคลอไรด์อิออนด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.1

2.3.2 บริเวณที่มีคลื่นและละออง (Splash Zone) ในบริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมเหล็กมากที่สุด เนื่องจากเกิดสภาวะเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying Process) ในวงรอบที่มีความถี่มากที่สุด โดยน้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตแห้งโดยวิธีการดูดซึม (Capillary Adsorption) จนกระทั่งคอนกรีตอิ่มตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกแห้งลง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งคราบเกลือไว้ภายในผิวคอนกรีต ดังนั้น เมื่ออยู่ในสภาวะเปียกอีกครั้ง ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ใกล้ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นการแพร่ของคลอไรด์อิออนจะซึมเข้าสู่ภายในด้วยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกสลับแห้งจะทำให้คลอไรด์บริเวณที่ผิวเกิดการสะสมของเกลือคลอไรด์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งจะเข้าสู่คอนกรีตและเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตในบริเวณที่มีคลื่นและละออง (Splash Zone) นี้คอนกรีตจะเปียกเร็วแต่แห้งช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นกลไกการแพร่ของอิออนคลอไรด์ (Ionic Diffusion) บริเวณนี้จึงมากกว่าการแพร่ในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Zone) และในทำนองเดียวกันในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลงจึงมากกว่าการแพร่ในบริเวณที่คอนกรีตแช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา (Submerged Zone or Seabed Zone) จึงทำให้บริเวณที่มีคลื่นและละออง (Splash Zone) มีโอกาสเกิดสนิมได้มากที่สุด

2.3.3 บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Zone) ในบริเวณนี้มีกลไกการแพร่ที่คล้ายกับบริเวณที่มีคลื่นและละออง (Splash Zone) แต่มีสภาวะเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying Process) ในวงรอบที่น้อยกว่า จึงทำให้บริเวณน้ำขึ้นน้ำลงมีโอกาสดเกิดสนิมรองลงมาจากบริเวณที่มีคลื่นและละอองและประเด็นที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ถึงแม้ว่าบริเวณนี้จะมีความเข้มข้นของออกซิเจนมากก็ตามแต่อัตราการแพร่ของออกซิเจนจะถูกจำกัดด้วยช่วงเวลาที่ยังคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียก

2.3.4 บริเวณที่คอนกรีตแช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา (Submerged Zone or Seabed Zone) ในบริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมเหล็กน้อยที่สุด เนื่องจากในบริเวณนี้มีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยและอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่เนื้อคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีตทั้งหมดเป็นช่องว่างที่อิมมิดด้วยน้ำซึ่งออกซิเจนจะละลายน้ำได้น้อยมาก ทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นได้น้อยตามไปด้วย

การเคลื่อนตัวของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม การใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้คลอไรด์เข้าสู่เนื้อได้เร็วขึ้น^[33] ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้งหรือมีช่วงแห้งที่ยาวนานกว่าช่วงเปียกจะมีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของสนิมมากกว่าคอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเลซึ่งเป็นช่วงเปียกที่ยาวนานกว่าช่วงแห้ง โดยการกัดกร่อนจะเริ่มขึ้นเมื่อคลอไรด์อิออนมีปริมาณมากพอที่ผิวเหล็กเสริม (Threshold Content of Chloride Ions) ซึ่งพบว่าช่วงนี้จะมีค่าความเป็นด่างลดลงจนถึงระดับวิกฤต

2.4 การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202 (Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration)

การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1202 นั้นจะต้องใช้ก้อนตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และมีความหนา 50 มิลลิเมตร สำหรับวิธีการทดสอบนั้นจะดำเนินการโดยผ่านไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Power Supply) ที่มีความต่างศักย์ 60 โวลต์ เป็นระยะเวลาต่อเนื่องกัน 6 ชั่วโมง^[7] ดังรูปที่ 2.2

ค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีนี้คือปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านก้อนตัวอย่างในเวลา 6 ชั่วโมง โดยในการทดสอบนี้ไม่ได้เป็นการวัดการซึมผ่านของคลอไรด์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติโดยกลไกต่างๆดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.2 แต่เป็นการวัดการซึมผ่านที่จำลองขึ้นโดยเสมือนว่าเป็นการซึมผ่านที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติโดยการใช้คุณสมบัติเรื่องแรงทางไฟฟ้าในการผลักดันให้อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น ด้วยเหตุนี้เองประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่นี้จึงมิได้มีเฉพาะอนุภาคประจุที่เป็นคลอไรด์เท่านั้นแต่ยังพบว่ามีประจุไฟฟ้าชนิดอื่นๆที่เกิดการเคลื่อนที่ด้วย

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อค่าประจุไฟฟ้าที่วัดได้ด้วยวิธีการทดสอบนี้อีกหลายประการด้วยกัน ได้แก่ อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน สารเคมีผสมเพิ่มประเภทที่เป็นโพลีเมอร์ซึ่งมีคุณสมบัติด้านประจุไฟฟ้า อายุของก้อนตัวอย่าง ฟองอากาศและระบบความ

ต่อเนื่องของโพรงคอนกรีต ชนิดของวัสดุมวลรวมหรือชนิดของวัสดุประสานที่ใช้ ประเภทของการบ่ม นอกจากนี้ในการทดสอบยังพบว่าความร้อนจากการผ่านกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในก้อนตัวอย่างจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพการนำไฟฟ้าของก้อนตัวอย่างคอนกรีตให้เพิ่มขึ้นทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย^[7-8] ด้วยเหตุนี้เองข้อมูลกระแสไฟฟ้าที่ทำการจัดเก็บนั้นจึงมีค่ามากเกินไปกว่าความเป็นจริงนำไปสู่การแปลความหมายข้อมูลของความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ที่ผิดพลาดได้

ตัวอย่างวิธีการคำนวณค่าปริมาณประจุไฟฟ้า (Coulomb Charge Passed) สามารถกระทำได้จากการคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่เริ่มต้นการทดสอบจนครบรอบ 6 ชั่วโมง ดังสมการ (2.1)

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (2.1)$$

โดยที่

Q คือ Coulomb Charge Passed, คูลอมบ์(C)

I_0 คือ กระแสไฟฟ้าที่เวลาเริ่มต้น, แอมแปร์ (A)

I_t คือ กระแสไฟฟ้าที่เวลา t นาที นับจากเริ่มการทดสอบ, แอมแปร์ (A)

การประเมินผลทดสอบด้วยวิธีนี้ เป็นการประเมินข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative Measurement) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งวิธีการทดสอบนี้ให้ผลการทดสอบที่รวดเร็ว และเหมาะที่จะใช้ในงานจริงเนื่องจากสภาวะในการทดสอบนี้คลอไรด์ถูกอิทธิพลอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าเป็นตัวเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่มากกว่าเป็นไปตามกลไกการซึมผ่านที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติของอนุภาคคลอไรด์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เนื่องจากในความเป็นจริงนั้นสภาพการเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตของคลอไรด์คงไม่มากไปกว่าสภาพที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้อีกแล้ว ด้วยเหตุนี้เองหากปริมาณประจุไฟฟ้าที่คำนวณได้ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด คอนกรีตที่ทดสอบดังกล่าวควรมีคุณสมบัติในด้านความต้านทานต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ที่ดีด้วย

2.5 งานวิจัยที่ผ่านมาและสมมติฐานเบื้องต้นในการศึกษาโดยวิธีประยุกต์

จากการศึกษามีงานวิจัยเป็นจำนวนมากที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเหนี่ยวนำให้ประจุไฟฟ้าคลอไรด์เกิดการเคลื่อนที่ผ่านก้อนตัวอย่าง ซึ่งเรียกรูปวิธีนี้ว่า Electrical Migration Technique^[9-10] ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยเกิดจากการนำสารละลายเกลือหรือไฮเดียมคลอไรด์มาใส่ไว้ในภาชนะบรรจุ (Chamber Cell) ด้านที่เป็นขั้วลบเพื่อให้เกิดแรงดันทางไฟฟ้าดันให้เกิดการเคลื่อนที่ของ

อนุภาคคอลลอยด์ซึ่งมีประจุลบไปยังอีกด้านหนึ่งที่เป็นขั้วบวก โดยอนุภาคคอลลอยด์จำเป็นจะต้องเคลื่อนที่ผ่านก้อนตัวอย่าง ซึ่งพบว่า ความเข้มข้นของคอลลอยด์ในสารละลายด้านท้ายน้ำ(Down Stream Solution) จะมีความเข้มข้นของคอลลอยด์เพิ่มขึ้นเสมอแสดงในรูปที่ 2.4 ในขณะที่สารละลายด้านต้นน้ำ(Up Stream Solution)จะมีความเข้มข้นของคอลลอยด์ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป งานวิจัยของ Chung-Chia Yang^[11] ได้ออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.5 พบว่าการอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นภายในสารละลายที่อยู่ในด้านท้ายน้ำหรือขั้วแอโนด (Anode or Down Stream Solution) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านก้อนตัวอย่างคอนกรีตจะเริ่มมีค่าคงที่ ทันทีที่ก้อนตัวอย่างเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State) ดังแสดงในรูปที่ 2.6(ก)และ2.6(ข) เนื่องจากในช่วงแรกก้อนตัวอย่างอยู่ในสภาวะไม่คงที่ (Non-Steady State) อนุภาคของคอลลอยด์ที่เคลื่อนที่ผ่านก้อนตัวอย่างคอนกรีตจากต้นน้ำ(Cathode or Upstream Solution)ไปยังด้านท้ายน้ำ (Anode or Down Stream Solution) นั้นสามารถแยกเป็นสองส่วนด้วยกัน คือส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่ผ่านโพรงคอนกรีตประเภทที่ต่อเนื่องถึงกัน (Continuous Pore , Pc) จากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง ในขณะที่อีกส่วนหนึ่งจะถูกกักเก็บไว้ในก้อนตัวอย่างด้วยโพรงคอนกรีตประเภทที่ไม่ต่อเนื่องถึงกัน (Discontinuous Pore , Pdc) ที่ละน้อย จนกระทั่งโพรงคอนกรีตประเภทที่ไม่ต่อเนื่องนี้เต็มและไม่สามารถเก็บอนุภาคของคอลลอยด์ได้อีกต่อไป ซึ่งเรียกว่าเป็นจุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Steady State) ทำให้หลังจากนั้นอัตราการไหลของอนุภาคของคอลลอยด์ที่ไหลเข้าและไหลออกจะมีค่าเท่ากัน^[11] ดังนั้นในการวัดปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตโดยวิธีประยุกต์จึงมีความจำเป็นจะต้องกำหนดคุณสมบัติฐานเบื้องต้นขึ้นดังต่อไปนี้

2.5.1 ปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ทำการศึกษาแยกออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ต่อเนื่องถึงกัน (Continuous Pore, Pc) และปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องถึงกัน (Discontinuous Pore, Pdc)

2.5.1.1 ปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ต่อเนื่องถึงกัน (Continuous Pore, Pc) หมายถึง ปริมาณของโพรงคอนกรีตที่มีลักษณะที่ต่อเนื่องกันโดยตลอดจากผิวภายนอกจากคอนกรีตด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง โพรงคอนกรีตประเภทนี้ทำให้อนุภาคของคอลลอยด์สามารถเคลื่อนที่จากผิวภายนอกคอนกรีตเคลื่อนที่จากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้

2.5.1.2 ปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องถึงกัน (Discontinuous Pore, Pdc) หมายถึง ปริมาณของโพรงคอนกรีตที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่องถึงกันโดยตลอด หรือ เป็นปริมาณของโพรงที่ตัน โพรงคอนกรีตประเภทนี้ทำให้อนุภาคของคอลลอยด์ไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้อัตถุอนุภาคของคอลลอยด์เหล่านี้จะถูกเก็บสะสมไว้ ในโพรงคอนกรีตที่เป็นโพรงตันนั่นเอง

2.5.2 ณ สภาวะที่ไม่คงที่ (Non-Steady State)อนุภาคของคอลลอยด์ที่ไหลเข้าก้อนตัวอย่าง (Cl⁻ in) จะมีค่ามากกว่าอนุภาคของคอลลอยด์ที่ไหลออกก้อนตัวอย่าง(Cl⁻ out) จนกระทั่งเริ่ม

มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าเท่ากันในที่สุด ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Steady State) ที่เวลา T_s จะได้ว่าปริมาณคลอไรด์ที่ไหลเข้า (C_{Iin}) จึงมีค่าเท่ากับ พื้นที่ใต้กราฟของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลเข้าเทียบกับเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง T_s ส่วนปริมาณคลอไรด์ที่ไหลออก (C_{Iout}) จึงมีค่าเท่ากับ พื้นที่ใต้กราฟของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลออกเทียบกับเวลา ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง T_s ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ถึง รูปที่ 2.8 และหากพิจารณา ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Steady State) พบว่าปริมาณอนุภาคของคลอไรด์สะสมในโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องถึงกัน (C_{Iacc}) จึงมีค่าเท่ากับ ผลต่างของปริมาณอนุภาคของคลอไรด์ไหลเข้าทั้งหมด (C_{Iin}) กับปริมาณคลอไรด์ที่ออกทั้งหมด (C_{Iout}) ที่เวลา T_s ดังแสดงในรูปที่ 2.9

2.5.3 คอนกรีตมีปริมาณของโพรงคอนกรีตทั้งหมด (Total Pore, P) เท่ากับผลรวมของปริมาณโพรงคอนกรีตที่ต่อเนื่องถึงกันกับปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องถึงกัน

2.5.4 คอนกรีตมีอัตราส่วนของปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ต่อเนื่องถึงกัน ต่อ ปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องถึงกันมีค่าคงที่ และเท่ากันในทุกทิศทาง

2.6 ข้อจำกัดวิธีประยุกต์

ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตด้วยวิธีประยุกต์ นั้นมีข้อจำกัดบางประการที่ต้องไม่นำมาพิจารณา เพื่อความง่ายต่อการวิเคราะห์และแปลความหมายข้อมูลจากการทดลอง ข้อจำกัดเหล่านี้ได้แก่

2.6.1 ไม่คำนึงถึงผลของแรงผลักรังสีไฟฟ้าอันเนื่องมาจากประจุชนิดเดียวกันที่เกิดการสะสมภายในโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องถึงกัน

2.6.2 ไม่คำนึงผลของโพรงคอนกรีตที่เป็นโพรงซึ่งอยู่เดี่ยวๆ อย่างอิสระ (Air Void or Entrapped Air) หมายถึง โพรงคอนกรีตที่ไม่มีการเชื่อมต่อกับผิวภายนอกคอนกรีตและไม่มีการเชื่อมต่อกับโพรงคอนกรีตที่อยู่ข้างเคียงด้วย เพื่อให้วิเคราะห์ผลการทดสอบได้สะดวกขึ้น

2.6.3 ไม่คำนึงผลของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่างทำการทดสอบ

2.7 การวิเคราะห์และแปลความหมายผลการทดลองวิธีประยุกต์จากสมมติฐานข้างต้น

2.7.1 ปริมาณโพรงคอนกรีตทั้งหมด (Total Pore, P)

ปริมาณโพรงคอนกรีตทั้งหมด หมายถึง ผลรวมของปริมาณโพรงคอนกรีตที่ต่อเนื่องกัน (Pc) กับปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องถึงกัน (Pdc) ดังแสดงในรูปที่ 1.8 ซึ่งในที่นี้การหาค่าดังกล่าวในเชิงเปรียบเทียบ (Relative Quantities) สามารถทำได้โดยการพิจารณาความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ตรวจวัดได้จากการทดลอง ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Ts) ดังนี้

ปริมาณโพรงคอนกรีตทั้งหมด แปรผันตามความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลเข้า ([Cl⁻in]) ดังสมการ (2.2)

$$P \propto [Cl^{in}] \quad (2.2)$$

2.7.2 ปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ต่อเนื่องกัน (Continuous Pore, Pc)

การหาค่าปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ต่อเนื่องกันในเชิงเปรียบเทียบนั้น สามารถทำได้โดยการพิจารณาความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ตรวจวัดได้จากการทดลอง ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Ts) ดังนี้

ปริมาณโพรงคอนกรีตที่ต่อเนื่องกัน (Pc) แปรผันตามความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลออก ([Cl⁻out]) ดังสมการ (2.3)

$$Pc \propto [Cl^{out}] \quad (2.3)$$

2.7.3 ปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องกัน (Discontinuous Pore, Pdc)

การหาค่าปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องกันในเชิงเปรียบเทียบ สามารถทำได้โดยการพิจารณาความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ตรวจวัดได้จากการทดลอง ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Ts) ดังนี้

ปริมาณโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องกัน (Pdc) แปรผันตาม ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บไว้ในก้อนตัวอย่างคอนกรีต ([Cl⁻acc]) ดังสมการ (2.4)

$$Pdc \propto [Cl^{acc}] \quad (2.4)$$

2.7.4 ค่าความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีต (Continuity of Pore)

ค่าความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีต หมายถึง อัตราส่วนปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ต่อเนื่องถึงกัน (Pc) ต่อปริมาณโพรงคอนกรีตทั้งหมด (P) ดังนั้นในการหาค่าความต่อเนื่องของ

โพรงคอนกรีตในเชิงเปรียบเทียบสามารถทำได้โดยการพิจารณาความเข้มข้นของอนุภาคของคลอไรด์ที่ตรวจวัดได้จากการทดลอง ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Ts) ดังนี้

ค่าความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีต แปรผันตาม อัตราส่วนของความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลออก ($[Cl^-]_{out}$) ต่อความเข้มข้นของอนุภาคของคลอไรด์ที่ไหลเข้า ($[Cl^-]_{in}$) ดังสมการ (2.5)

$$\text{The Continuity of Pore} \propto \frac{[Cl^-]_{out}}{[Cl^-]_{in}} \quad (2.5)$$

2.7.5 ค่าความไม่ต่อเนื่องของโพรงคอนกรีต (Discontinuity of Pore)

ค่าความไม่ต่อเนื่องของโพรงคอนกรีต หมายถึง อัตราส่วนปริมาณของโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องถึงกัน (Pdc) ต่อปริมาณของโพรงคอนกรีตทั้งหมด (P) ดังนั้นในการหาค่าความไม่ต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตในเชิงเปรียบเทียบสามารถทำได้โดยการพิจารณาความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ตรวจวัดได้จากการทดลอง ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Ts) ดังนี้

ค่าความไม่ต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตแปรผันตาม อัตราส่วนของความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ถูกกักเก็บไว้ในก้อนตัวอย่างคอนกรีต ($[Cl^-]_{acc}$) ต่อ ปริมาณของโพรงคอนกรีตทั้งหมด ($[Cl^-]_{in}$) ดังสมการ (2.6)

$$\text{The Discontinuity of Pore} \propto \frac{[Cl^-]_{acc}}{[Cl^-]_{in}} \quad (2.6)$$

2.7.6 การนิยามค่าดัชนีความสามารถในการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ (K)

ในการทดสอบโดยวิธีประยุกต์นั้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องสามารถอธิบายให้ได้ว่า ในแต่ละสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีความแตกต่างกันนั้น สัดส่วนผสมใดจะเป็นสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในงานคอนกรีตสัมผัสน้ำทะเล หรือ งานคอนกรีตที่ทนสภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์ได้

ด้วยเหตุนี้เองจึงมีความจำเป็นต้องกำหนดค่าดัชนีขึ้นมาค่าหนึ่งเพื่อใช้เป็นตัวดัชนีชี้วัดต่อการยอมให้คลอไรด์ซึมผ่านได้ของคอนกรีตขึ้นมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยวิธีประยุกต์ โดยเรียกค่าที่ถูกนิยามขึ้นมาใหม่นี้ว่า “ค่าดัชนีความสามารถในการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ (K)”

ค่าดัชนีความสามารถในการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ โดยวิธีประยุกต์นี้มีแนวความคิดพื้นฐานที่ว่า คอนกรีตที่มีความสามารถในการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ที่สูง นั้นควรจะเป็นคอนกรีตที่มีปริมาณโพรงคอนกรีตทั้งหมด (P) เป็นจำนวนมาก และ ในบรรดาโพรงคอนกรีตทั้งหมดเหล่านั้น

ส่วนมากเป็นโพรงคอนกรีตประเภทต่อเนื่องถึงกัน (Pc) นั่นเอง และนอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการผ่านกระแสไฟฟ้าตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนกระทั่งคอนกรีตเข้าสู่สภาวะคงที่ควรมีระยะเวลา (T_s) ไม่นานอีกด้วย

ดังนั้นค่าดัชนีความสามารถในการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ (K) จึงสามารถนิยามให้แปรผันตามอัตราส่วนระหว่าง ปริมาณโพรงคอนกรีตประเภทต่อเนื่องถึงกัน (Pc) ต่อ เวลาที่ใช้ในการผ่านกระแสไฟฟ้าตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนกระทั่งคอนกรีตเข้าสู่สภาวะคงที่ควรมีระยะเวลา (T_s) ดังสมการ (2.7)

แต่ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณโพรงคอนกรีตที่ต่อเนื่องถึงกัน (Pc) ยังแปรผันตามความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลออก ($[Cl^-out]$) ได้ดังที่ได้แสดงในสมการ (2.3) ดังนั้นค่าดัชนีความสามารถในการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ (K) จึงแสดงได้อีกรูปแบบหนึ่งดังสมการ (2.8)

$$K \propto \frac{Pc}{T_s} \quad (2.7)$$

$$K \propto \frac{[Cl^-out]}{T_s} \quad (2.8)$$

2.8 การทดสอบเพื่อหาปริมาณของโพรงและการกระจายขนาดโพรงภายในเนื้อคอนกรีตด้วยวิธีเอ็มไอพี (MIP; Mercury-Intrusion Porosimetry)

2.8.1 วิธีเอ็มไอพี หรือ Mercury-Intrusion Porosimetry

เป็นวิธีการทดสอบที่นิยมแพร่หลายมากที่สุดในการศึกษาลักษณะของโครงสร้างของโพรงคอนกรีตมีหลายรูปแบบด้วยกัน เริ่มทดลองในช่วงแรกๆ เมื่อประมาณ 65 ปีมาแล้วโดย Ritter และ Drake^[21] โดยช่วงแรกเป็นวิธีที่นิยมวิธีหนึ่งเพื่อศึกษาปริมาณโพรงภายในวัสดุประเภท เซรามิกส์ หิน ดินเหนียว และเพสต์ประเภทซีเมนต์ (cement-based materials) เนื่องจากการทดสอบที่ง่าย และแสดงผลของปริมาตรและขนาดโพรงภายในรวมทั้งการกระจายขนาดของโพรงคอนกรีต (Pore Size Distribution) และปริมาณโพรงคอนกรีตรวม (Total Porosity) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงคอนกรีตที่เริ่มตรวจวัดได้ (Threshold Diameter) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงคอนกรีตตามทฤษฎี (The theoretical pore diameter) หรือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงคอนกรีตโตสุดที่มีความต่อเนื่องถึงกัน (The maximum continuous pore diameter) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงคอนกรีตเฉลี่ย (The mean pore diameter)

2.8.2 แนวความคิดของวิธีเอ็มไอพี (Concept of Mercury Intrusion Porosimetry)

โดยวิธีเอ็มไอพีนี้ต้องใช้ของเหลวที่มีลักษณะการเกาะตัวกับผิวสัมผัสแบบไม่เปียก (Non-wetting liquid) ซึ่งมีค่าของมุมสัมผัส (θ) มากกว่า 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.10(ก) ซึ่งในที่นี้ได้แก่ปรอท (Mercury) ซึ่งจะถูกรวมเข้าให้เกิดการเคลื่อนที่เข้าสู่ระบบโครงสร้างโพรงคอนกรีต^[22] โดยความดันที่ใช้ในการอัดปรอทนั้นเป็นฟังก์ชันของมุมสัมผัส (Contact Angle) และมีสมมติฐานว่ารูปร่างของโพรงคอนกรีตที่ถูกปรอทอัดเข้าไปนั้นเป็นรูปทรงกระบอก โดยจากสมมติฐานดังกล่าวจะได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของโพรงคอนกรีตกับความดันที่เปลี่ยนแปลงได้ดังสมการ (2.9)

$$\Delta P = \frac{-2\sigma_{l/v} \cos \theta}{r} \quad (2.9)$$

โดยที่	ΔP	หมายถึง ความดันเกจ (Gauge Pressure)
	r	หมายถึง รัศมีของโพรงคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ถูกปรอทอัดเข้าไป
	$\sigma_{l/v}$	หมายถึง แรงตึงผิวของปรอท ซึ่งมีค่า 485 มิลลินิวตันต่อเมตร
	θ	หมายถึง มุมสัมผัสของปรอทกับผนังโพรงคอนกรีต (Contact Angle)

สมการ (2.9) ของ Washburn^[23] ซึ่งเป็นสมการทั่วไป ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับของเหลวทุกประเภทไม่ว่าจะเป็นของเหลวที่มีลักษณะการเกาะตัวกับผิวสัมผัสแบบไม่เปียก (Non-wetting liquid)^[22] หรือของเหลวที่มีลักษณะการเกาะตัวกับผิวสัมผัสแบบเปียกได้ก็ตาม (Wetting liquid) ดังแสดงในรูปที่ 2.10(ข) ปรัชญาการค้นคว้าของของเหลวทั้งสองประเภทที่จุ่มลงในหลอดแก้วรูปทรงกระบอกสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11(ก) และรูปที่ 2.11(ข) ตามลำดับ โดยของเหลวที่มีลักษณะการเกาะตัวกับผิวสัมผัสแบบเปียกได้จะมีค่ามุมสัมผัสที่น้อยกว่า 90 องศา ค่าความดันเกจ จะมีค่าติดลบในขณะที่ของเหลวที่ไม่เปียกจะมีมุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา ค่าความดันเกจ จะมีค่าเป็นบวก นั่นคือจะต้องใช้ความดันที่มีค่ามากกว่าความดันบรรยากาศเพื่อที่จะดันปรอทเข้าสู่โพรงคอนกรีตได้ ในกรณีที่มุมสัมผัสมีค่าเป็น ศูนย์องศา จากสมการ (2.9) กลายเป็นสมการ (2.10)

$$\Delta P = \frac{-2\sigma_{l/v}}{r} \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.9) พบว่าสำหรับ พบว่า รัศมีของโพรงคอนกรีตที่มีขนาดเล็กมากพบว่าความดันที่ใช้จะต้องมีค่ามากกว่าความดันบรรยากาศมากตามไปด้วย โดยหากขนาดรัศมีของโพรง

คอนกรีตมีค่าประมาณ 18 อังสตรอม หรือ 18×10^{-10} เมตร ในอัดปรอทเข้าสู่โพรงจะต้องใช้ความดันเกจสูงถึง 415 เมกกะปาสคาล โดยDiamond^[24] ได้ให้ข้อสังเกตว่าวิธีเอ็มไอพี นี้มีสมมติฐานอยู่บนพื้นฐานของรูปร่างของโพรงคอนกรีตที่จะเป็นทรงกระบอก^[21-24] ซึ่งคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงเนื่องจากโพรงคอนกรีตที่เกิดจากซีเมนต์เพสต์ซึ่งมีรูปร่างของโพรงที่มีลักษณะซับซ้อนและหลากหลายมากกว่าที่จะถูกสมมติให้เป็นรูปทรงกระบอกเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาที่เรียกว่า การเกิดสภาพคอขวด (Neck-Bottle Effect) ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 2.8.6.2 ที่เกี่ยวข้องกับข้อจำกัดและปัญหาที่เกิดจากสมมติฐานของวิธีเอ็มไอพีต่อไป

2.8.3 ขั้นตอนการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพี

ในปัจจุบันพบว่าเครื่องเอ็มไอพีที่ถูกผลิตออกมาในเชิงพาณิชย์มีหลายรูปแบบด้วยกัน แต่ทุก ๆ รูปแบบที่ต่าง ๆ กันนั้นล้วนใช้หลักการเดียวกัน การทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพีนี้ มีขั้นตอนหลัก 2 ขั้นตอนดังนี้

2.8.3.1 ขั้นตอนการคัดเลือกและเตรียมตัวอย่างคอนกรีต (Sample Preparation)

ก้อนตัวอย่างคอนกรีตจะถูกตัดให้เป็นลูกบาศก์ชิ้นเล็กๆซึ่งมีปริมาตรไม่เกิน 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร และปริมาตรของปรอทที่ใช้ร้อยละ 5 ถึง 10 ของปริมาตรก้อนตัวอย่าง ในกรณีที่คอนกรีตที่ทำการทดสอบมีเนื้อไม่สม่ำเสมอ (Heterogeneities) ก้อนตัวอย่างที่เลือกใช้ควรมีปริมาตรมากกว่า ในกรณีที่คอนกรีตที่ทำการทดสอบมีเนื้อที่สม่ำเสมอ เนื่องจากก้อนตัวอย่างที่มีปริมาตรมากกว่าจะทำให้ได้ผลการทดสอบที่มีความถูกต้องมากขึ้นและลดความคลาดเคลื่อนในการทดสอบไปได้มาก ดังนั้นเกณฑ์การพิจารณาขนาดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับวิธีเอ็มไอพีจึงมีอยู่เพียง 2 ประการด้วยกัน ซึ่งได้แก่ ขนาดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตต้องมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของภาชนะที่ใช้ใส่ก้อนตัวอย่างระหว่างดำเนินการอัดปรอทเข้าสู่โพรงคอนกรีต (Chamber or Empty Cell) และ ปริมาตรโพรงคอนกรีตที่มีอยู่ในจริงภายในก้อนตัวอย่างที่จะทำการทดสอบนั้นจะต้องมีค่าไม่มากกว่าปริมาตรของปรอทจะถูกอัดเข้าไประหว่างการทดสอบ^[25] โดยงานวิจัยของ Hearn และ Hooton^[26] แสดงให้เห็นว่าผลจากการเลือกใช้ขนาดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่แตกต่างกันทำให้ได้ผลทดสอบที่แตกต่างกันมากไปด้วย

สิ่งที่มีความสำคัญมากคือก้อนตัวอย่างจะต้องถูกทำให้แห้งสนิท ซึ่งเงื่อนไขของการทดสอบที่ดินน้ำมันภายในโพรงคอนกรีตจะต้องปราศจากของเหลวทุกชนิด

2.8.3.2 ขั้นตอนการอัดปรอทเข้าสู่โพรงคอนกรีต (Mercury Intrusion Experiment)

ปรอทจะถูกดันเข้าสู่โพรงคอนกรีตโดยที่ปลายอีกด้านหนึ่งจะเป็นสุญญากาศโดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะดูดน้ำและอากาศที่ตกค้างภายในโพรงคอนกรีต เนื่องจากหากมีน้ำเคลือบอยู่ที่ผนังโพรงคอนกรีตจะทำให้ค่ามุมสัมผัส (Contact Angle) ระหว่างผนังโพรงคอนกรีตกับปรอทมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไป ทันทีที่เครื่องอัดปรอท (Penetrometer) เริ่มอัดปรอทที่ความดันต่ำๆ

จะทำให้สามารถตรวจวัดปริมาณโพรงที่มีขนาดใหญ่ได้ก่อน และเมื่อเพิ่มความดันขึ้นเรื่อยๆจะทำให้สามารถตรวจวัดปริมาณโพรงที่มีขนาดเล็กลงได้อย่างต่อเนื่องตามลำดับจนถึงโพรงที่มีขนาดเล็กสุดที่ความดันสูงสุด ทำให้สามารถทราบถึงการกระจายขนาดของโพรงคอนกรีตได้จากการวัดความดันและปริมาตรพรอทอัดเข้าไป จากทฤษฎีพบว่าขนาดโพรงคอนกรีตใหญ่สุดที่ตรวจวัดได้มีค่าประมาณ 1 มิลลิเมตร และประเด็นที่สำคัญอีกประการหนึ่งคืออัตราการให้ความดันของเครื่องอัดพรอทจะต้องไม่สูงมากจนเกินไปเนื่องจากในการเคลื่อนที่เข้าไปในระบบโพรงคอนกรีตของพรอทนั้นต้องการระยะเวลาที่แน่นอนค่าหนึ่ง กล่าวโดยสรุปคือขนาดของโพรงคอนกรีตที่ทำการตรวจวัดในแต่ละช่วงของความดันนั้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาตรของพรอทที่ถูกอัดเข้าไปและความดันที่ใช้ในการอัดพรอทเข้าไป

ขนาดของปริมาณโพรงคอนกรีตที่ถูกแทนที่ด้วยพรอทจะมีความสัมพันธ์ต่อความดันที่ใช้ในการอัดพรอท เครื่องเอ็มไอพีที่ใช้โดยทั่วไปต้องใช้ความดันที่สูงมากถึง 400 เมกกะปาสคาล ซึ่งสามารถตรวจสอบขนาดโพรงที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรได้บางส่วน อย่างไรก็ตามที่ระดับความดันสูงมากมักพบปัญหา เช่น อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นทำให้ปริมาตรของพรอทส่วนที่แทนที่เกิดการเปลี่ยนแปลง ส่วนปัญหาอีกประการคือภายใต้ความดันสูงพรอทจะมีคุณสมบัติเป็นของเหลวที่สามารถอัดตัวได้

ในการหาค่าการกระจายขนาดของโพรงคอนกรีตสามารถทำได้โดย เมื่อพิจารณาสมการ (2.9) พบว่าถ้าหากการวัดความดัน (ΔP) เริ่มต้นที่ความดันบรรยากาศดังนั้นจะได้ว่า (ΔP) สามารถเขียนได้เป็น P ซึ่งเป็นความดันเกจ สมการ (2.9) จะกลายเป็นสมการ (2.11) ดังนี้

$$Pr = 2\sigma_{lv} \cos \theta \quad (2.11)$$

หากหาอนุพันธ์สมการที่ (2.11) ซึ่งในที่นี้ σ_{lv} และ $\cos \theta$ ซึ่งมีค่าคงที่จะได้ว่า

$$Pdr + rdP = 0$$

$$\frac{r}{P} = -\frac{dr}{dP} \quad (2.12)$$

การกระจายขนาดของโพรงคอนกรีต(Pore Size Distribution) ถูกนิยามว่า คือฟังก์ชันของอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของโพรงคอนกรีตเทียบกับรัศมี ซึ่งแทนด้วย $D_V(r)$ สามารถเขียนแทนด้วยสมการ (2.13)

$$dV = D_V(r)dr \quad (2.13)$$

โดยที่ dV หมายถึง ส่วนของปริมาตรของโพรงที่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงของรัศมี r ถึง $r + dr$ จากสมการที่ (2.12) นำมาแทนที่ในสมการ (2.13) จะได้ดังสมการที่ (2.14) ดังนี้

$$-dV = D_v(r) \frac{r}{P} dP \quad (2.14)$$

หากพิจารณาจะพบว่าค่าของ dV มีค่าเปลี่ยนแปลงลดลง ดังนั้นสมการ (2.14) จะกลายเป็นสมการ (2.15) ดังนี้

$$D_v(r) = \frac{P}{r} \frac{dV}{dP} \quad (2.15)$$

ในระหว่างการทดลองมีการเพิ่มความดันขึ้นเรื่อยๆ จาก P ไปเป็น $P + \Delta P$ ทำให้มีปริมาณทางขวามือในสมการ (2.8) สามารถตรวจวัดได้ในแต่ละช่วงที่มีการเพิ่มความดัน คือ P และ ΔP ในขณะที่สามารถคำนวณหาค่า r ได้จากสมการ (2.11) ในทำนองเดียวกัน ΔV สามารถวัดได้จากปริมาตรของปรอทในส่วนที่ถูกแทนที่ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

2.8.4 สรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพี

2.8.4.1 มุมสัมผัส (contact angle) มีผลต่อความถูกต้องของขนาดโพรงคอนกรีตที่คำนวณได้ เช่น การใช้ค่ามุมสัมผัสคลาดเคลื่อนจากค่าจริงไปร้อยละ 1 ของมุมสัมผัส 140 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าขนาดโพรงคลาดเคลื่อนไปร้อยละ 1.50

2.8.4.2 โดยทั่วไปสำหรับมุมสัมผัสของวัสดุประเภทซีเมนต์เฟสดี (cement-based materials) ขึ้นกับวิธีการทำตัวอย่างให้แห้ง โดยเฟสดีที่ทำให้แห้งด้วยเตาอบ ที่ 105 องศาเซลเซียส (Oven dried sample) จะมีค่ามุมสัมผัสเป็น 117 องศาเซลเซียส

2.8.4.3 วิธีการทำตัวอย่างให้แห้ง (sample drying) ตัวอย่างที่ทดสอบจะต้องทำให้แห้ง ซึ่งการใช้กรรมวิธีที่ทำให้ตัวอย่างแห้งแตกต่างกันที่แต่ละวิธีจะทำให้มีสภาวะน้ำคงเหลือภายในโพรงแตกต่างกันไปด้วยโดยเฉพาะในโพรงคอนกรีตที่มีขนาดเล็กๆ ดังนั้นกรรมวิธีการทำให้ตัวอย่างแห้งจึงมีอิทธิพลต่อผลการทดสอบในส่วนขนาดของโพรงขนาดเล็ก

2.8.4.4 ความบริสุทธิ์ของปรอท (mercury purity) ในการทดสอบควรใช้ปรอทบริสุทธิ์ (Distilled Mercury) เพื่อหลีกเลี่ยงความแปรปรวนในส่วนหาค่ามุมสัมผัสและค่าแรงดึงผิวปรอท

2.8.4.5 อัตราการให้ความดันของปรอท

2.8.5 ผลการทดสอบโดยทั่วไปด้วยเครื่องเอ็มไอพี

ผลการทดสอบโดยทั่วไปด้วยวิธีเอ็มไอพีมักแสดงด้วยการกระจายของขนาดโพรงภายในเนื้อคอนกรีตเมื่อเทียบกับโพรงคอนกรีตขนาดต่างๆ (Cumulative Pore Size Distribution Curve) โดยทั่วไปการกระจายขนาดของโพรงคอนกรีต ที่ได้จากการทดลองมักอยู่ในรูปของเส้นกราฟการสะสมของการกระจายขนาดของโพรงคอนกรีต (Cumulative Pore Size Distribution Curve) โดย Winslow และ Lowell ได้ทำการอบแห้งก้อนตัวอย่างด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาดำเนินการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพีของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.60 ที่อายุ 1 วัน ถึง 318 วัน^[27] ซึ่งสามารถแสดงการกระจายของขนาดโพรงภายในเนื้อคอนกรีตซึ่งโพรงขนาดใหญ่ถึงโพรงขนาดเล็กที่สุดซึ่งถูกแทนที่ด้วยปรอทที่เข้าไปในโพรงคอนกรีตต่อน้ำหนักแห้งของมวลคอนกรีตได้ดังรูปที่ 2.12

2.8.6 ข้อจำกัดและปัญหาที่เกิดจากสมมติฐานของวิธีเอ็มไอพี ที่พึงระวังในการหาปริมาตรโพรงคอนกรีต

2.8.6.1 โพรงภายในเนื้อคอนกรีตถูกตั้งอยู่บนให้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก (Cylindrical Shape) ซึ่งไม่ตรงกับสภาพความเป็นจริง เนื่องจากรูปร่างโพรงที่เกิดจากซีเมนต์เพสต์มีรูปร่างที่ซับซ้อนกว่ามาก

2.8.6.2 การใช้สมมติฐานว่าความต่อเนื่องของโพรงที่มีลักษณะเรียงจากโพรงขนาดใหญ่ด้านนอกไปสู่โพรงที่มีขนาดเล็กกว่าที่อยู่ด้านใน แต่การเชื่อมต่อในสภาพจริงอาจไม่เป็นเช่นนั้น ผลทดสอบจึงคลาดเคลื่อน โดยปริมาตรของโพรงขนาดใหญ่กว่าด้านในจะถูกแสดงผลรวมไปในส่วนปริมาตรของโพรงขนาดเล็กกว่าลำดับก่อนหน้า หรือที่เรียกว่า ปัญหาสภาพคอขวด (Neck-Bottle Effect) คือ มีโพรงขนาดเล็กเชื่อมกลางระหว่างโพรงขนาดใหญ่กว่า ดังนั้นปริมาตรของโพรงขนาดใหญ่กว่าด้านในที่แสดงออกมาจะถูกรวมในส่วนปริมาตรของโพรงขนาดเล็กที่เชื่อมดังแสดงในรูปที่ 2.13

2.8.6.3 การวัดปริมาตรโพรงทั้งหมดไม่สามารถทำได้ เนื่องจากโพรงบางส่วนมีขนาดเล็กมากคือ มีขนาดเล็กกว่าโพรงเฉลี่ย คือ 0.007 ไมครอน ต้องใช้ความดันปรอทที่สูงมากกว่าค่าสูงสุดที่เครื่องเอ็มไอพีจะสามารถทำได้คือประมาณ 30,000 ปอนด์ต่อตร.นิ้ว ดังนั้นจึงเรียกปริมาตรของโพรงคอนกรีตที่ไม่สามารถวัดได้เหล่านี้ว่า ปริมาตรโพรงที่หายไป (Lost Porosity)

2.8.6.4 การใช้ความดันสูงอาจทำลายผนังโพรงคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องให้เกิดการต่อเนื่องขึ้น หรือเกิดการทำลายความต่อเนื่องของโพรงภายในซีเมนต์เพสต์ให้เชื่อมต่อกัน ทำให้ได้ค่าการกระจายขนาดของโพรงคอนกรีตที่มีความคลาดเคลื่อน

2.8.7 ข้อแนะนำในการศึกษาโพรงด้วยวิธีเอ็มไอพี

จากปัญหาและข้อจำกัดของด้วยวิธีเอ็มไอพีโดยเฉพาะในเรื่องลักษณะการเรียงขนาดโพรงและปัญหาคอขวดซึ่งส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนต่อผลของการกระจายขนาดโพรงและความ

คดเคี้ยวภายในโพรงเองซึ่งไม่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง (Tortuosity) อย่างไรก็ตามจะไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ในเชิงปริมาตรโพรงทั้งหมด (Porosity) ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีการแนะนำให้ใช้วิธีเอ็มไอพี เพื่อจุดประสงค์ในการวิเคราะห์ปริมาตรโพรง (Pore Volume) และไม่ควรรใช้เพื่อการวิเคราะห์การกระจายขนาดของโพรงคอนกรีต

ตารางที่ 2.1 ผลการทดสอบเชิงคุณภาพ (Qualitative Measurement) ตามมาตรฐาน ASTM C1202^[7]

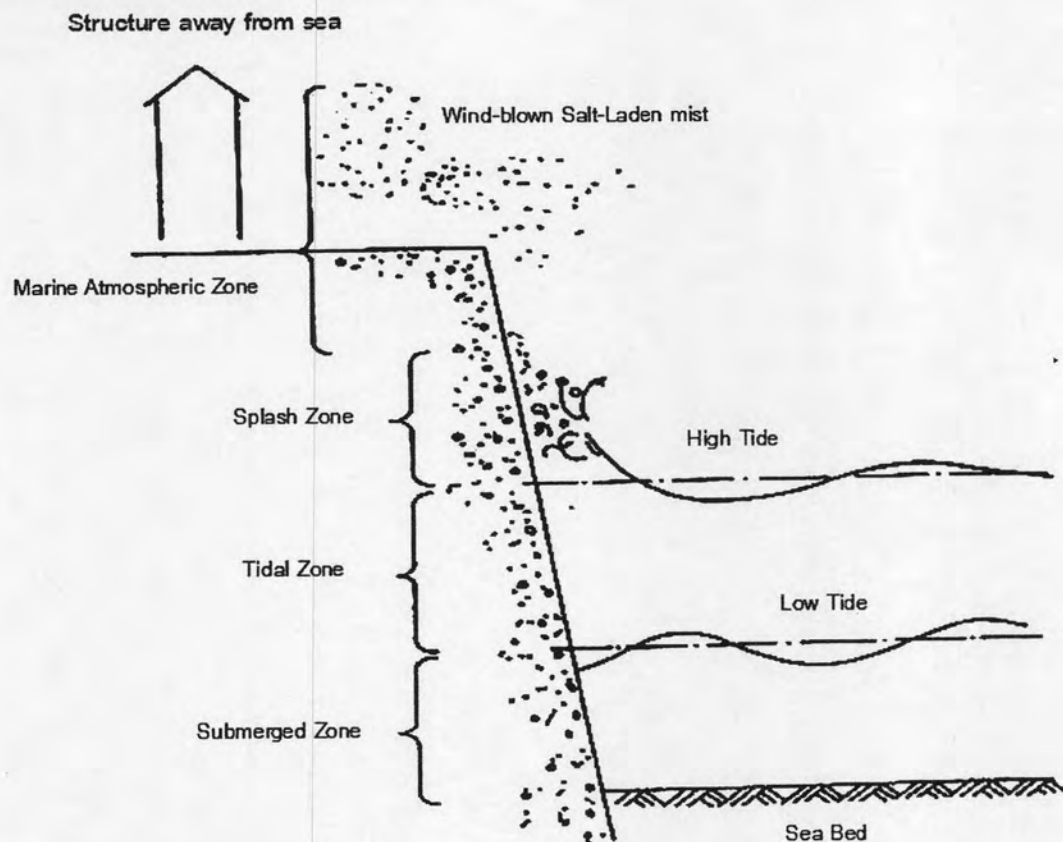
ค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ย(คูลอมบ์)	ความสามารถในการซึมผ่านได้ของคลอไรด์
มากกว่า 4,000	สูง
2,000 - 4,000	ปานกลาง
1,000 - 2,000	ต่ำ
100 - 1,000	ต่ำมาก
น้อยกว่า 100	ซึมผ่านได้น้อยมากหรือไม่ได้เลย

ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยวิธีเอ็มไอพีเพื่อหาการกระจายขนาดของโพรงคอนกรีต^[31]

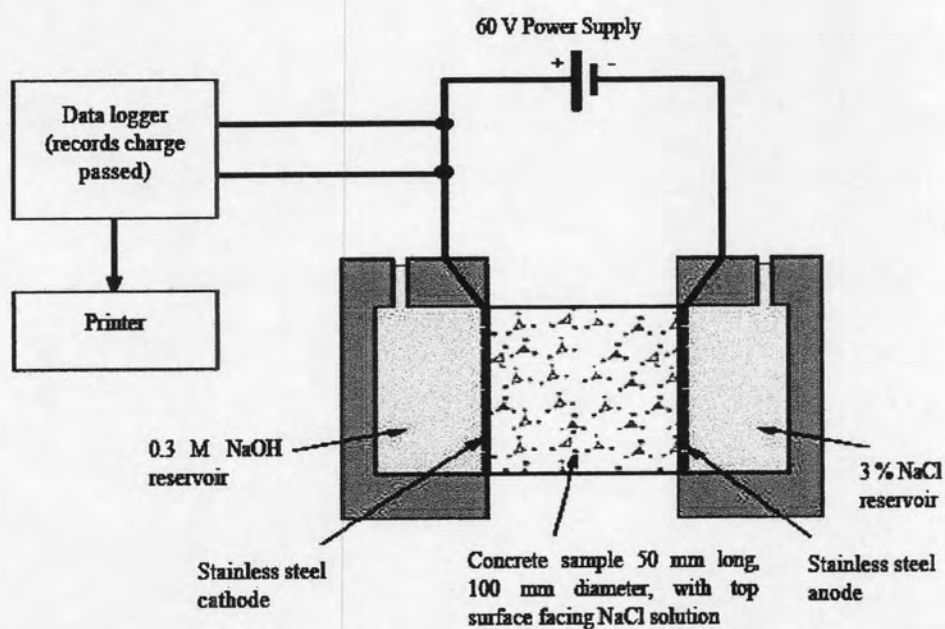
Sample Identity	w/c Ratio	Age (days)	Hg Volume Intruded (cm ³ /g)	Pore Volume* (cm ³ /g)	Volume Intruded (cm ³ /g)
1	0.3	5	0.133	0.188	70.8
	0.3	11	0.116	0.187	61.9
	0.3	34	0.104	0.187	57.0
2	0.6	4	0.335	0.440	76.2
	0.6	22	0.278	0.431	64.5
	0.6	36	0.251	0.412	60.9
3	0.8	4	0.489	0.565	86.5
	0.8	22	0.449	0.527	85.2
	0.8	36	0.425	0.521	81.6

*measured from water immersion experiments

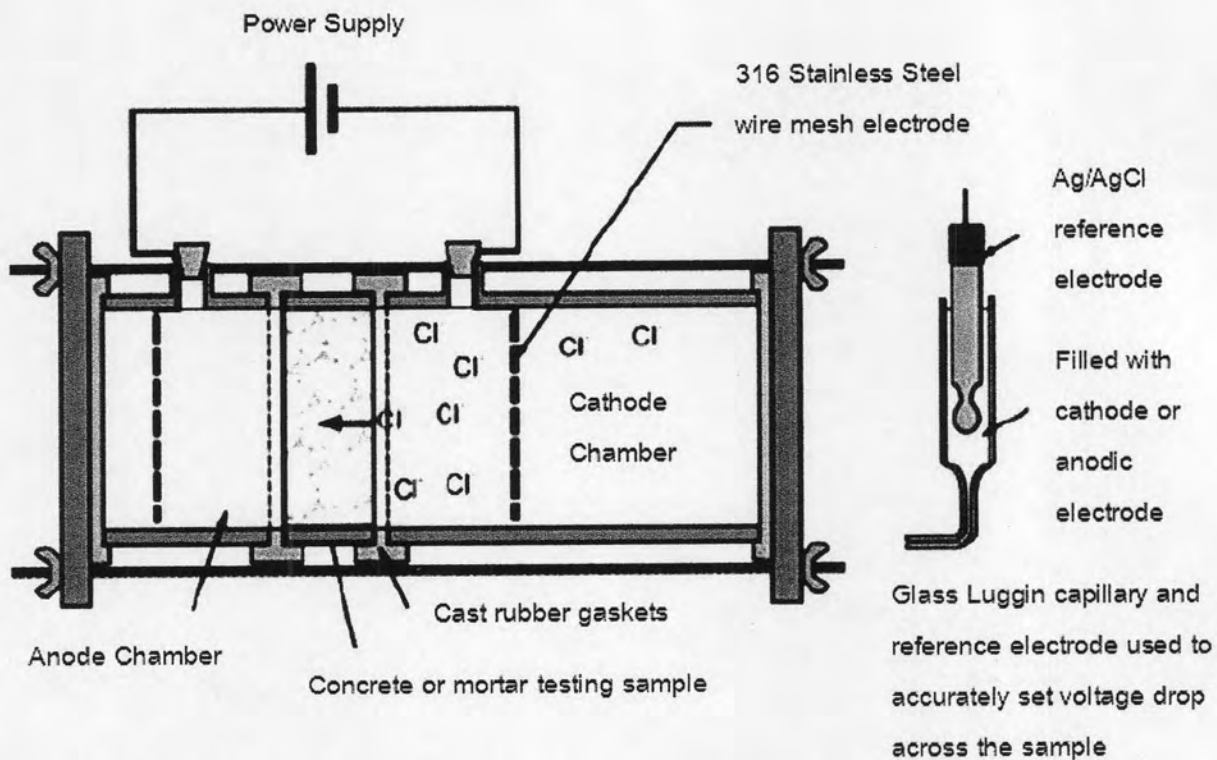
Types of Marine Basic Exposure Zone



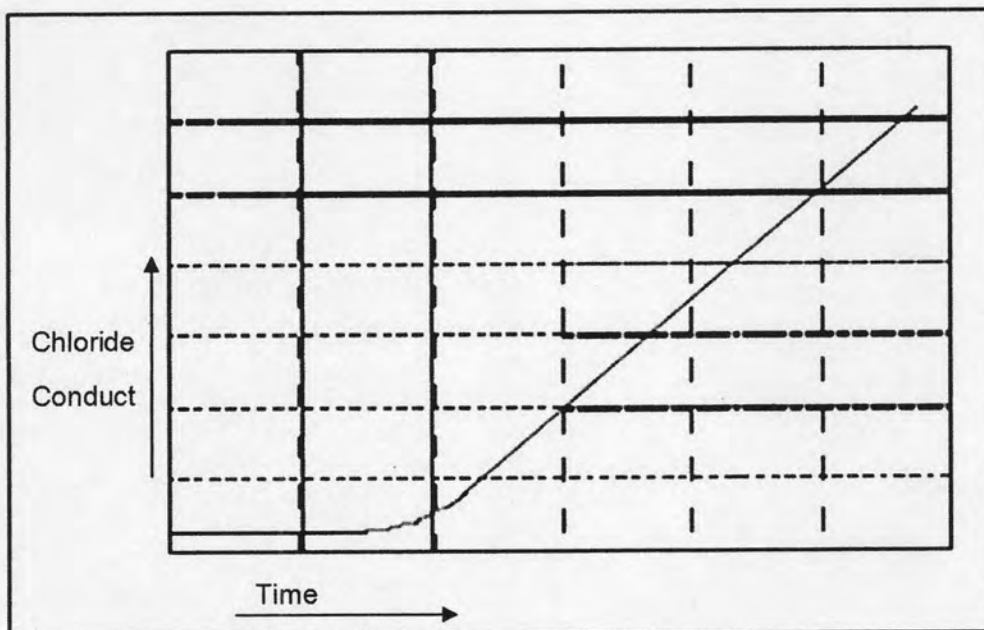
รูปที่ 2.1 การจำแนกตามลักษณะการเปิดเผยของโครงสร้างสู่สิ่งแวดล้อม (Basic Exposure Zones)



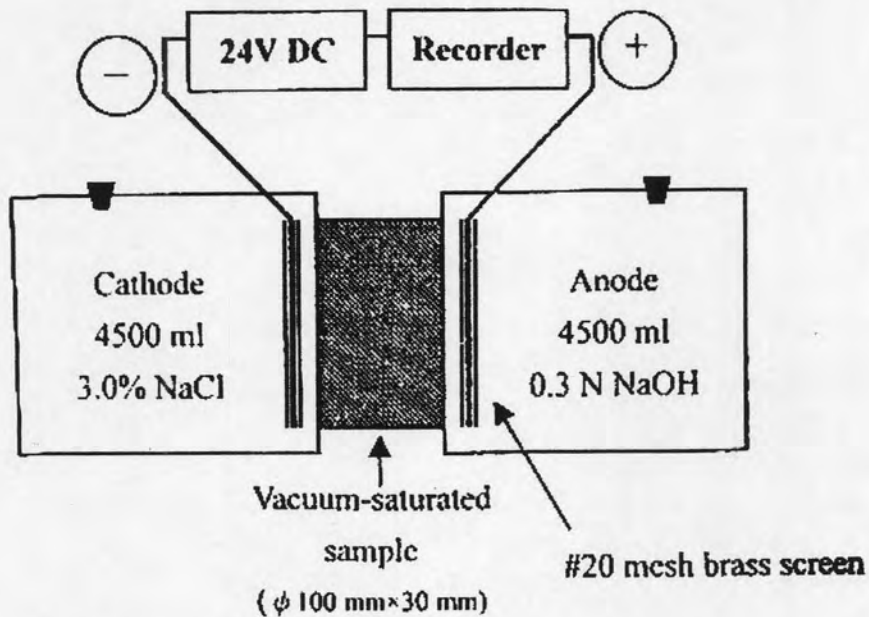
รูปที่ 2.2 การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202^[7]



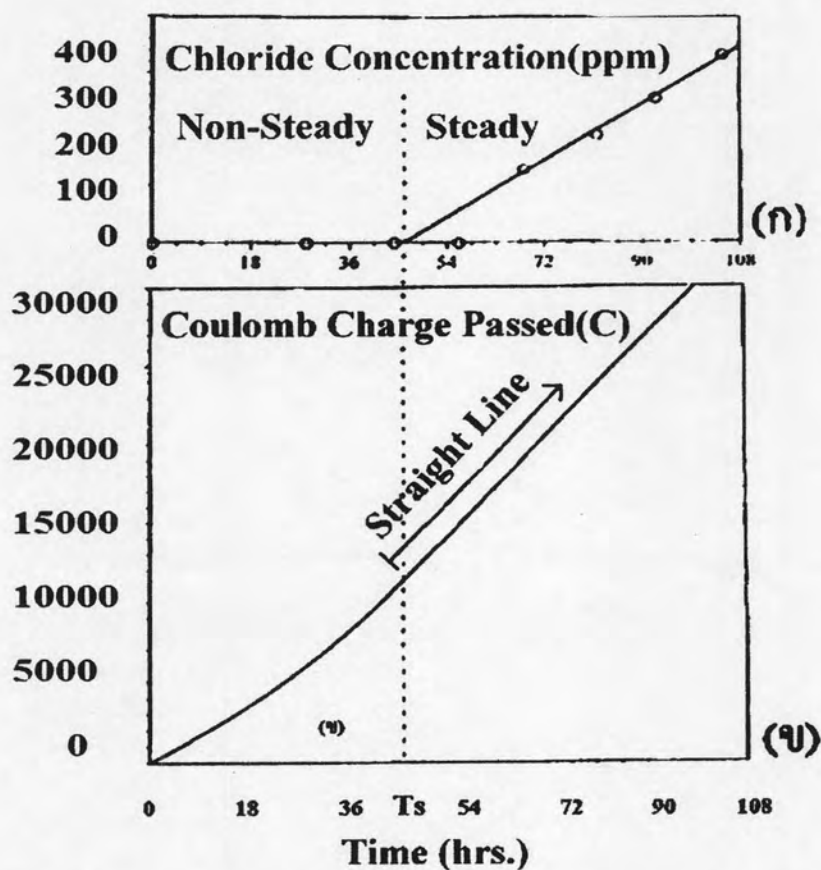
รูปที่ 2.3 การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบโดยวิธี Electrical Migration Technique^[9]



รูปที่ 2.4 ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนในสารละลายทำนองน้ำที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วแอโนด^[30]

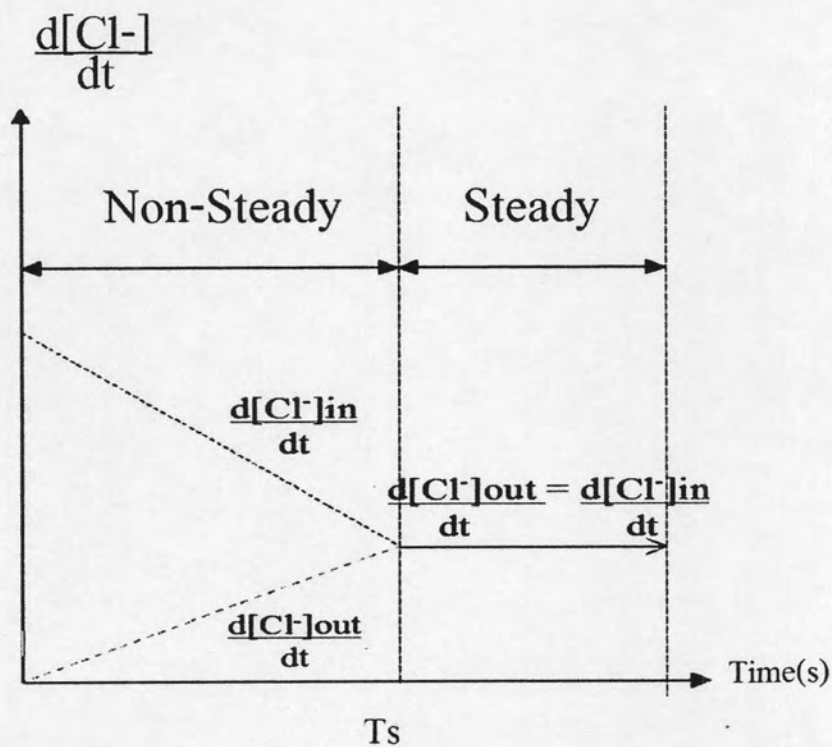


รูปที่ 2.5 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบของ Chung-Chia Yang ^[11]

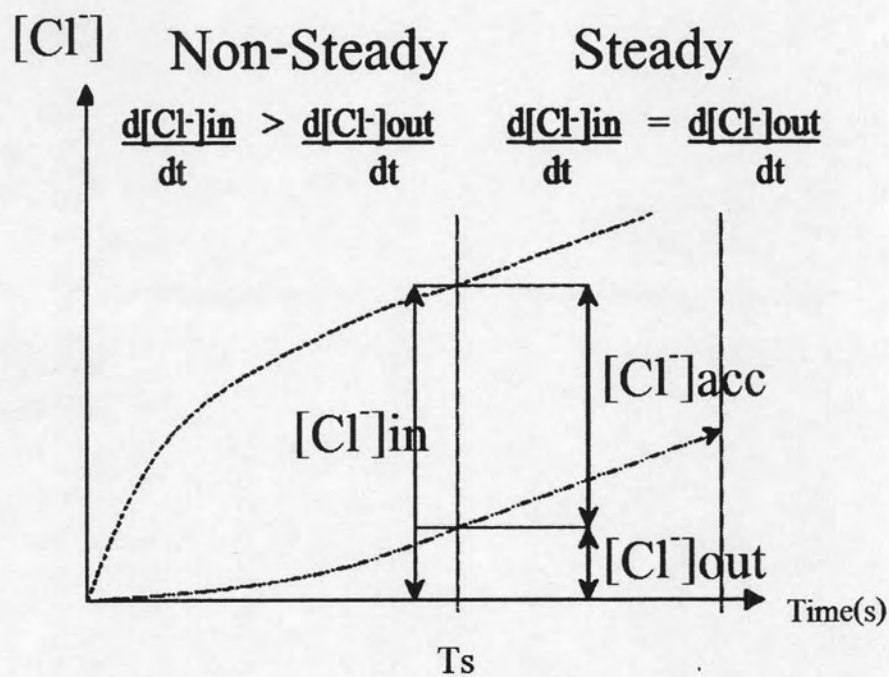


รูปที่ 2.6(ก) การความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอไรด์เทียบกับเวลาเมื่อเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ ^[11]

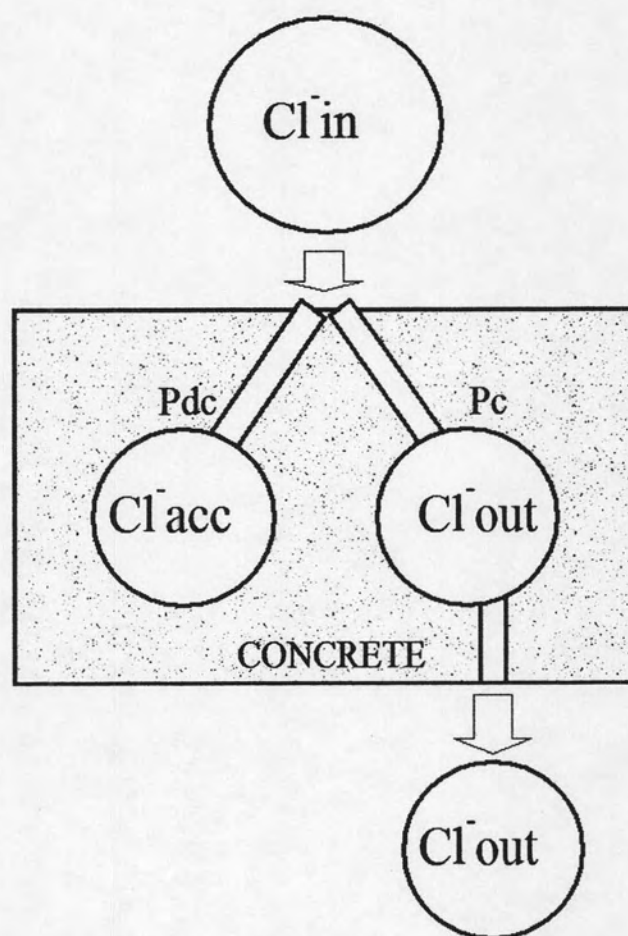
รูปที่ 2.6(ข) ค่าของปริมาณประจุไฟฟ้าเทียบกับเวลาเมื่อเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ ^[11]



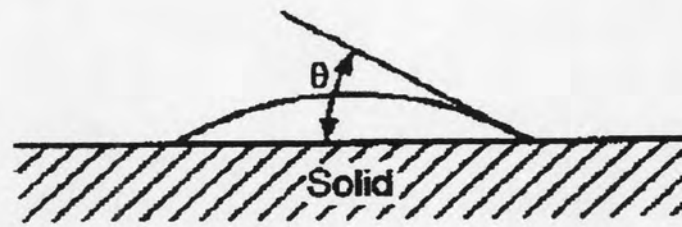
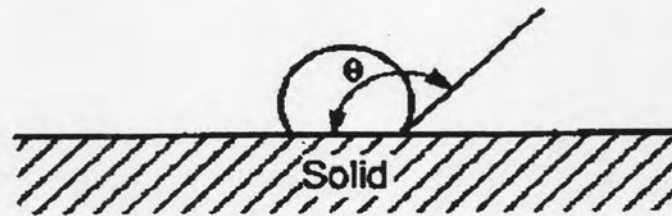
รูปที่ 2.7 อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่เข้า ($\frac{d[Cl^-]_{in}}{dt}$) และออก ($\frac{d[Cl^-]_{out}}{dt}$) ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เข้า $[Cl^-]_{in}$ และออก $[Cl^-]_{out}$ ที่เวลาต่างๆ

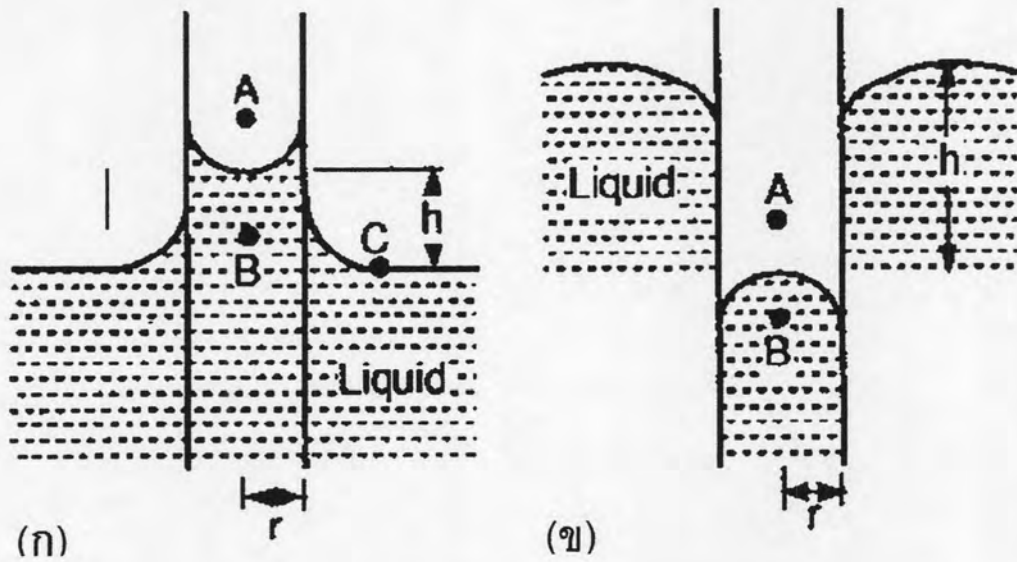


รูปที่ 2.9 ภาพจำลองตามสมมติฐานแสดงกลไกการเคลื่อนที่ผ่านโพรงคอนกรีตของคลอไรด์

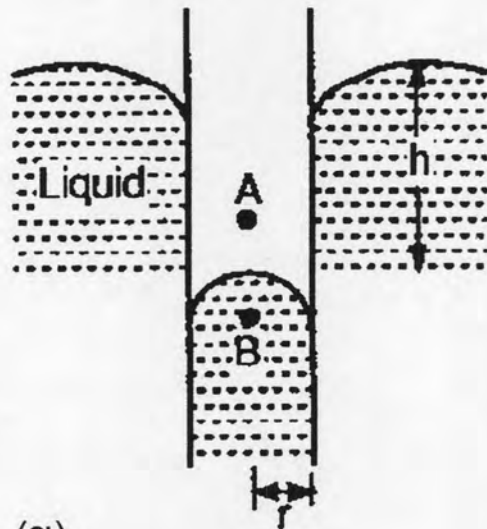
(ก.) **Wetting, $\theta < 90^\circ$** (ข.) **Nonwetting, $\theta > 90^\circ$**

รูปที่ 2.10(ก) มุมสัมผัสของของเหลวที่มีลักษณะการเกาะตัวกับผิวสัมผัสแบบเปียก^[76]

รูปที่ 2.10(ข) มุมสัมผัสของของเหลวที่มีลักษณะการเกาะตัวกับผิวสัมผัสแบบไม่เปียก^[76]



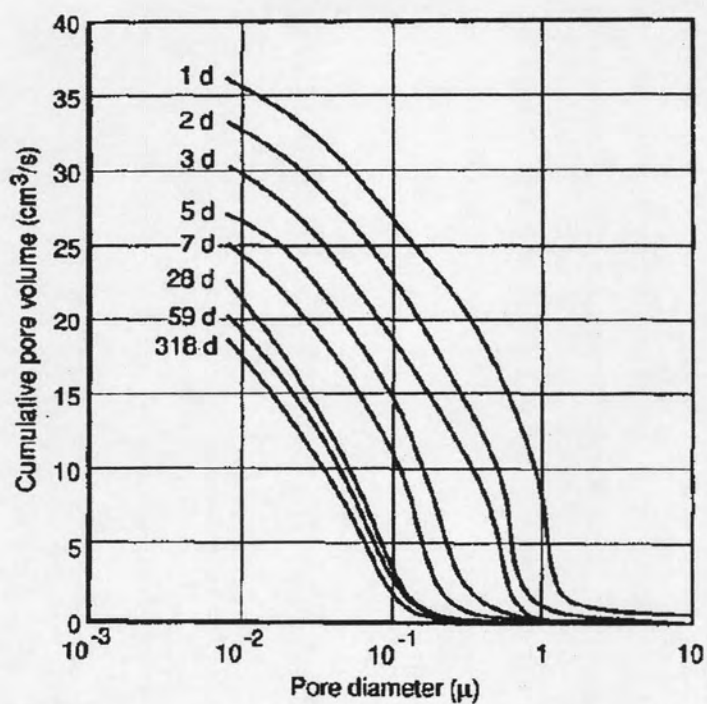
(ก)



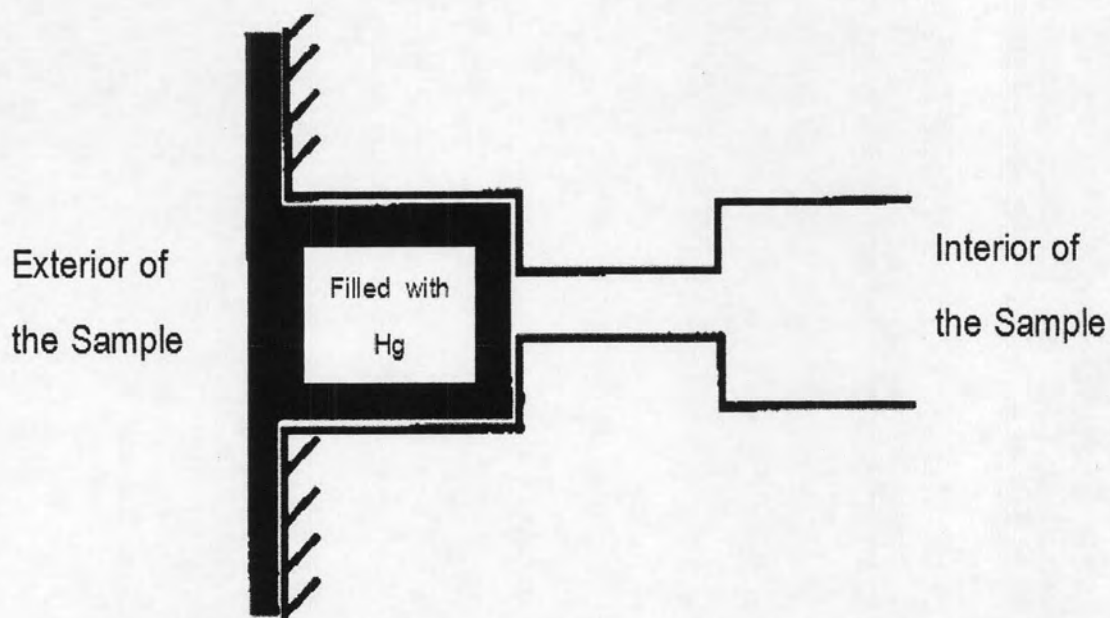
(ข)

รูปที่ 2.11(ก) ผลแคพิลลารีจากของเหลวที่มีลักษณะการเกาะตัวกับผิวสัมผัสแบบเปียก
(Wetting; $\theta < 90$ องศา)^[24]

รูปที่ 2.11(ข) ผลแคพิลลารีจากของเหลวที่มีลักษณะการเกาะตัวกับผิวสัมผัสแบบไม่เปียก
(Non-Wetting; $\theta > 90$ องศา)^[24]



รูปที่ 2.12 การกระจายขนาดโพรงคอนกรีตของ Winslow และ Lowell^[27] ของซีเมนต์เพสต์ $w/c=0.60$



รูปที่ 2.13 ปัญหาที่เกิดขึ้นจากวิธีเดิมไอพีจากการเกิดสภาพคอขวด (Neck-Bottle)^[24]