มยพ. 1332-68

มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน

กรมโยธาธิการและผังเมือง
กระทรวงมหาดไทย
พ.ศ. 2568

มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน

มยผ. 1332 - 68

กรมโยธาธิการและผังเมือง

กระทรวงมหาดไทย

พ.ศ. 2568

คำนำ

กรมโยธาธิการและผังเมืองได้ประกาศใช้มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน (มยผ. 1332) ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2550 และต่อมามีการปรับปรุงมาตรฐานดังกล่าวในปี พ.ศ. 2555 แต่ในปัจจุบันเทคโนโลยีและการใช้งานคอนกรีตได้มีการพัฒนาเปลี่ยนแปลงไปเป็นอย่างมาก ทำให้เนื้อหาของมาตรฐานดังกล่าวไม่สอดคล้องกับเทคโนโลยีและวัสดุก่อสร้างในปัจจุบัน ประกอบกับสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ได้เสนอให้กรมโยธาธิการและผังเมืองปรับปรุงมาตรฐานงานคอนกรีต เมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน (มยผ. 1332 - 55) ให้มีความทันสมัย ครอบคลุมปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และชนิดวัสดุประสานเพิ่มขึ้น และสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมของพื้นที่ทั้งประเทศ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง และเป็นการยกระดับมาตรฐานปฏิบัติงานก่อสร้างให้โครงสร้างมีความคงทนและอายุการใช้งานเป็นไปตามที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น กรมโยธาธิการและผังเมืองจึงได้แต่งตั้งคณะทำงานเพื่อปรับปรุงแก้ไขมาตรฐานดังกล่าว โดยมีสาระสำคัญในการปรับปรุงเกี่ยวกับความคงทนของคอนกรีต ซึ่งได้อ้างอิงข้อมูลทางวิชาการที่เป็นปัจจุบันของประเทศไทย ได้แก่ การเกิดสนิม การหดตัว และการกัดกร่อน รวมถึงปรับปรุงตัวอย่างการคำนวณการออกแบบคอนกรีตที่มีสภาวะการใช้งานต่าง ๆ

กรมโยธาธิการและผังเมืองขอขอบคุณศาสตราจารย์ ดร.สมนึก ตั้งเติมสิริกุล รองศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช ดร.วนิดา พงศ์ศักดิ์สวัสดิ์ ดร.สนธยา ทองอรุณศรี รองศาสตราจารย์ ดร.ปิติศานต์ กร้ำมาตร และรองศาสตราจารย์ ดร.วรางคณา แสงสร้อย ที่สนับสนุนข้อมูลต่าง ๆ ในการปรับปรุงมาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน (มยผ. 1332 - 68) จนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า การปฏิบัติตามมาตรฐานดังกล่าว จะทำให้อาคารที่อยู่ในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ มีความคงทนและมีอายุการใช้งานที่ยืนยาว อันจะเป็นการประหยัดงบประมาณและลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมบำรุงรักษาลง อีกทั้งยังเสริมสร้างความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนมากยิ่งขึ้นด้วย

(นายพงษ์นรา เย็นยิ่ง)
อธิบดีกรมโยธาธิการและผังเมือง

คณะทำงานเพื่อปรับปรุงแก้ไขมาตรฐานงานคอนกรีต
เมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน (มยผ. 1332 - 55)

ดร. ธนิต ใจสอาด	ผู้อำนวยการสำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร	ประธานคณะทำงาน
ศาสตราจารย์ ดร. สมนึก ตั้งเติมสิริกุล	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	คณะทำงาน
รองศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช	มหาวิทยาลัยบูรพา	คณะทำงาน
ดร. วนิดา พงศ์ศักดิ์สวัสดิ์	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ	คณะทำงาน
ดร. สนธยา ทองอรุณศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก	คณะทำงาน
รองศาสตราจารย์ ดร. ปิติศานต์ กร้ำมาตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	คณะทำงาน
รองศาสตราจารย์ ดร. วรางคณา แสงสร้อย	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	คณะทำงาน
นายสมพงษ์ ธีรานพ	วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ	คณะทำงาน
นางสาวอตินุช สินศิลาเกตุ	วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ	คณะทำงาน
ดร. อรณิชา รองวิริยะพานิช	วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ สำนักสนับสนุนและพัฒนาตามผังเมือง	คณะทำงาน
ดร. สุวัฒน์ รามจันทร์	วิศวกรโยธาชำนาญการ สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร	คณะทำงานและเลขานุการ
นายบดินทร์กรณ์ เรืองเดชอังกูร	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร	คณะทำงานและผู้ช่วยเลขานุการ
นายรัฐธรรมนูญ ปัตตาเน	พนักงานวิศวกรโยธา สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร	คณะทำงานและผู้ช่วยเลขานุการ

ISBN 974 -

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537

โดย สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร
กรมโยธาธิการและผังเมือง
ถนนพระรามที่ 6 แขวงพญาไท เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400
โทรศัพท์ 0 2299 4351 โทรสาร 0 2299 4347

สารบัญ

หน้าที่

ส่วนที่ 1 ขอบข่าย **1**

ส่วนที่ 2 นิยามและสัญลักษณ์ **1**

2.1 นิยาม 1

2.2 สัญลักษณ์ 3

ส่วนที่ 3 คุณสมบัติของคอนกรีตเมื่อพิจารณาเรื่องความคงทน 6

3.1 สถานะของคอนกรีต 6

3.2 คุณสมบัติของคอนกรีตในสถานะต่าง ๆ 6

3.3 คอนกรีตในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ 9

3.4 อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมขั้นต่ำของโครงสร้างคอนกรีต 11

ส่วนที่ 4 ข้อกำหนดทั่วไปในการออกแบบเมื่อพิจารณาด้านความคงทน **13**

4.1 ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด 13

4.2 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด 16

4.3 ความกว้างรอยร้าวมากที่สุดที่ยอมรับได้ 17

4.4 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ยอมให้ในส่วนผสมคอนกรีต 18

ส่วนที่ 5 การออกแบบเมื่อพิจารณาการเกิดสนิม **19**

5.1 การเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมทะเล 19

5.2 การเกิดสนิมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น 27

ส่วนที่ 6 การออกแบบเมื่อพิจารณาการหดตัว **30**

6.1 การหดตัวรวม 31

6.2 การหดตัวออโตจีนัส 33

6.3 การหดตัวแห้ง 36

ส่วนที่ 7 การออกแบบเมื่อพิจารณาการเสื่อมสภาพเนื่องจากซัลเฟต **39**

7.1 การเสื่อมสภาพเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต 39

7.2 การเสื่อมสภาพเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 41

ส่วนที่ 8 การออกแบบเมื่อพิจารณาเรื่องอัคคีภัย **43**

เอกสารอ้างอิง **44**

สารบัญ (ต่อ)

หน้าที่

ภาคผนวก ก ตารางและแผนภูมิการออกแบบสำหรับโครงสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล **45**

ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ **60**

ข1 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์จากน้ำทะเล 60

ข2 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน 75

ข3 การคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะภายนอกของหินที่นำมาผสมคอนกรีต 78

ข4 การคำนวณการหดตัวรวมของคอนกรีต 79

ข5 การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต 87

ภาคผนวก ค การหาค่าจากเว็บแอพพลิเคชั่นผ่านเว็บไซต์ **88**

มยผ. 1332 - 68
มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน

ส่วนที่ 1 ขอบข่าย

1.1 มาตรฐานงานคอนกรีตนี้ ครอบคลุมถึงงานคอนกรีตทั่วไปและโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง แต่ไม่ครอบคลุมถึงโครงสร้างคอนกรีตชนิดพิเศษบางชนิดที่มีการใช้วัสดุพิเศษ เช่น โพลิเมอร์คอนกรีต คอนกรีตมวลเบา คอนกรีตมวลหนัก คอนกรีตผสมไฟเบอร์ คอนกรีตบ่มด้วยตัวเอง เป็นต้น

1.2 มาตรฐานนี้ใช้หน่วย SI (International System Units) เป็นหลัก และใช้ค่าการแปลงหน่วยของแรง1 กิโลกรัมแรง เท่ากับ 10 นิวตัน

1.3 มาตรฐานนี้ไม่ได้ครอบคลุมทุกชนิดของปัญหาความคงทน ดังนั้น ผู้ปฏิบัติตามมาตรฐานจำเป็นต้องใช้ข้อกำหนดหรือมาตรฐานอื่นที่เป็นที่ยอมรับสำหรับประกอบในการพิจารณาชนิดปัญหาความคงทนที่ไม่ได้ครอบคลุม

ส่วนที่ 2 นิยามและสัญลักษณ์

2.1 นิยาม

"การเสื่อมสภาพ (deterioration)" หมายถึง การเปลี่ยนสภาพของวัสดุ เนื่องจากแรง สิ่งแวดล้อมหรืออิทธิพลภายใน ทำให้คอนกรีตหรือเหล็กเสริมภายในคอนกรีต มีความสามารถในการรับน้ำหนักหรือความคงทนต่ำลง เช่น การแตกร้าวของคอนกรีต การหลุดล่อนของคอนกรีต การบวมตัวของคอนกรีต การเกิดสนิมของเหล็กเสริม การสูญเสียกำลังของคอนกรีต การสูญเสียกำลังของเหล็กเสริม เป็นต้น

"การหดตัวแห้ง (drying shrinkage)" หมายถึง การหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้นจากคอนกรีตไปสู่สิ่งแวดล้อม หลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว

"การหดตัวรวม (total shrinkage)" หมายถึง ผลรวมของการหดตัวออโตจีนัสและการหดตัวแห้ง ซึ่งคอนกรีตในโครงสร้างทั่วไปจะเกิดการหดตัวออโตจีนัสร่วมกับการหดตัวแห้ง จึงทำให้การหดตัวรวมเป็นค่าที่ต้องนำไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างที่ต้องการควบคุมการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต

"การหดตัวออโตจีนัส (autogenous shrinkage)" หมายถึง ผลรวมของการหดตัวทางเคมีที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (chemical shrinkage) และการหดตัวที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นในช่องว่างแคพิลลารีในเพสต์ ทำให้เกิดแรงดึงแคพิลลารี (capillary tension) ขึ้นในช่องว่างแคพิลลารี (capillary pore) ซึ่งมีผลให้คอนกรีตหดตัว (physical shrinkage due to self-desiccation) ทั้งนี้ไม่รวมการหดตัวแห้งที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นให้กับสิ่งแวดล้อม

"ความคงทน (durability)" หมายถึง ความสามารถของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในการต้านทานการเสื่อมสภาพ

“**ความลึกคาร์บอเนชั่น (carbonation depth)”** หมายถึง ระยะที่วัดจากผิวของคอนกรีต เข้าไปข้างในเนื้อคอนกรีต จนถึงแนวแบ่งแยกระหว่างส่วนที่เกิดคาร์บอเนตและยังไม่เกิดคาร์บอเนต จากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น

“คาร์บอเนชั่น (carbonation)” หมายถึง ปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสิ่งแวดล้อมกับสารละลายไฮดรอกไซด์ในเพสต์ มอร์ต้าร์ หรือคอนกรีต ได้ผลลัพธ์เป็นสารประกอบคาร์บอเนต

“คอนกรีต” หมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นด้วยส่วนผสมของวัสดุประสาน เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกหรือปูนซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลาน มวลรวมละเอียดเช่นทราย มวลรวมหยาบเช่นหินหรือกรวด และน้ำ โดยมีหรือไม่มีสารเคมีหรือแร่ผสมเพิ่ม

“ปลอดการซ่อมแซม (repair-free)” หมายถึง การที่ไม่ต้องทำการซ่อมแซมองค์อาคารของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ทั้งนี้ไม่รวมถึงการตรวจสอบต่างๆในด้านวิศวกรรมโยธา

“ระยะหุ้มเหล็กเสริม (covering)” หมายถึง ระยะที่วัดจากผิวคอนกรีตถึงผิวนอกสุดของเหล็กปลอกเดี่ยว หรือเหล็กปลอกเกลียว หรือเหล็กลูกตั้ง ในกรณีไม่มีเหล็กดังกล่าว ให้วัดถึงผิวของเหล็กเสริมที่อยู่ใกล้กับผิวนอกที่สุด

“แร่ผสมเพิ่ม (mineral admixtures)” หมายถึง แร่ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดที่เติมลงไปในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อปรับปรุงความสามารถในการใช้งาน เช่น เพิ่มกำลัง เพิ่มความทนทาน หรือทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์ได้บางส่วน เป็นต้น

“สารเคมีผสมเพิ่ม (chemical admixtures)” หมายถึง สารเคมีที่ใช้ผสมในคอนกรีต ไม่ว่าจะผสมในน้ำผสมคอนกรีตก่อนการผสมคอนกรีต หรือผสมในขณะที่ผสมคอนกรีต หรือผสมก่อนการเทคอนกรีต เพื่อเพิ่มสมบัติบางประการของคอนกรีต เช่น เพิ่มความสามารถในการทำงาน เพิ่มกำลัง หน่วงหรือเร่งการแข็งตัว เป็นต้น

“วัสดุประสาน (cementitious materials or binder)” หมายถึง ผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์หรือปูนซีเมนต์ผสมแร่ผสมเพิ่ม เมื่อนำมาผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้แข็งตัว เมื่อผสมกับมวลรวมจะเป็นคอนกรีต

“ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์” หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผง ได้จากการบดปูนเม็ดกับแคลเซียมซัลเฟตรูปใด รูปหนึ่งหรือหลายรูป และมีคุณลักษณะเป็นไปตาม มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15

“ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน” หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผสมอย่างสม่ำเสมอระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับปอซโซลานละเอียด โดยการบดปูนเม็ดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับปอซโซลาน หรือการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับปอซโซลานที่บดละเอียด หรือทั้งการบดและการผสม

“ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก” หมายถึง ปูนซีเมนต์ที่ก่อตัวและแข็งตัวเนื่องจากทำปฏิกิริยากับน้ำ และมีความสามารถทำนองเดียวกันนี้เมื่ออยู่ในน้ำ และมีคุณลักษณะเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2594

“อายุการใช้งาน (service life)” หมายถึง ระยะเวลาในการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต โดยที่โครงสร้างคอนกรีตดังกล่าวยังมีความแข็งแรงและความปลอดภัยในระดับที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบได้

“อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซม (repair free service life)” หมายถึง ระยะเวลาในการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงนับตั้งแต่วันที่สร้างเสร็จภายใต้มาตรฐานการก่อสร้างที่ดีและมีการใช้งานและบำรุงรักษาถูกต้องตามหลักวิชาการและวัตถุประสงค์ในการออกแบบ โดยไม่จำเป็นต้องได้รับการซ่อมแซมโครงสร้าง ทั้งนี้ไม่รวมถึงการตรวจสอบด้านวิศวกรรมโยธาที่จำเป็นต้องตรวจสอบเป็นประจำอยู่แล้ว โครงสร้างคอนกรีตอาจมีรอยร้าวได้แต่ต้องมีขนาดรอยร้าวไม่เกินกว่าที่มาตรฐานนี้กำหนด ยกเว้นรอยร้าวที่เกิดจากการใช้งานผิดวัตถุประสงค์หรืออุบัติเหตุหรือภัยพิบัติทางธรรมชาติ

2.2 สัญลักษณ์

b	หมายถึง	น้ำหนักวัสดุประสานในส่วนผสมคอนกรีต 1 ลบ.ม. หน่วยเป็น กก.
c	หมายถึง	ระยะหุ้มเหล็กเสริม หน่วยเป็น มม.
c_0	หมายถึง	ค่าแนะนำสำหรับระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป หน่วยเป็น มม.
c_{min}	หมายถึง	ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด หน่วยเป็น มม.
C_0	หมายถึง	ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่บริเวณผิวเหล็กเสริม โดยเป็นคลอไรด์ส่วนที่อยู่ในส่วนผสมของคอนกรีตตั้งแต่แรก (ในช่วงการผลิต) หน่วยเป็น ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
C_a	หมายถึง	อัตราการสะสมของคลอไรด์ในอากาศ หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อตารางเมตรต่อวัน
C_d	หมายถึง	ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่บริเวณผิวเหล็กเสริม หน่วยเป็น ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
C_{lim}	หมายถึง	ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต เป็นปริมาณคลอไรด์ที่จะทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเกิดสนิมได้ หน่วยเป็น ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
C_s	หมายถึง	ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต หน่วยเป็น ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
C_s'	หมายถึง	ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต หน่วยเป็น ร้อยละโดยน้ำหนักของคอนกรีต
D_a	หมายถึง	สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต หน่วยเป็น ซม.^{2} ปี$^{-1}$
D_k	หมายถึง	สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าว หน่วยเป็น ซม.^{2} ปี$^{-1}$
$D_{k,c}$	หมายถึง	สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนที่ไม่มีรอยร้าว หน่วยเป็น ซม.^{2} ปี$^{-1}$
$D_{k,fa}$	หมายถึง	สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยที่ไม่มีรอยร้าว หน่วยเป็น ซม.^{2} ปี$^{-1}$

D_0	หมายถึง	สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์จากผลของรอยร้าวในคอนกรีต หน่วยเป็น ซม.^{2} ปี$^{-1}$
erf	หมายถึง	สมการ error function หรือ Gauss error function เป็นสมการคณิตศาสตร์รูปแบบหนึ่ง $erf(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-n^2} dn$
E	หมายถึง	ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางถึงตำแหน่งของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องการออกแบบ หน่วยเป็น เมตร
$f_c^{'}$	หมายถึง	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต หน่วยเป็น เมกาปาสกาล
$f_c^{'}(28)$	หมายถึง	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน หน่วยเป็น เมกาปาสกาล
k	หมายถึง	สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชั่น หน่วยเป็น มม. ปี$^{-0.5}$
k_r	หมายถึง	สัมประสิทธิ์ผลของเถ้าลอยที่มีต่อความลึกคาร์บอเนชั่น (เถ้าลอยชนิด 2ก และ 2ข ตามมาตรฐาน มอก. 2135 หรือ ว.ส.ท. 1014)
n	หมายถึง	อัตราส่วนของมวลรวมโดยปริมาตรในส่วนผสม
RH	หมายถึง	ความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม หน่วยเป็น ร้อยละ
S	หมายถึง	พื้นที่ผิวซึ่งสัมผัสอากาศของโครงสร้างคอนกรีต หน่วยเป็น มม.^{2}
t	หมายถึง	อายุที่พิจารณาหาค่าการหดตัว หน่วยเป็น วัน
t_0	หมายถึง	อายุของคอนกรีตที่เริ่มสัมผัสกับอากาศหลังจากการบ่มชื้น หน่วยเป็น วัน
t_r	หมายถึง	อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมของโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องการ หน่วยเป็น ปี
T	หมายถึง	อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม หน่วยเป็น องศาเซลเซียส
V	หมายถึง	ปริมาตรของโครงสร้างคอนกรีต หน่วยเป็น มม.^{3}
V/S	หมายถึง	อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวซึ่งสัมผัสอากาศของคอนกรีต หน่วยเป็น มม.
w	หมายถึง	ปริมาณน้ำ ในส่วนผสมคอนกรีตปริมาตร 1 ม.^{3} หน่วยเป็น กก.
W	หมายถึง	ขนาดความกว้างของรอยร้าว หน่วยเป็น มม.
W_a	หมายถึง	ขนาดความกว้างของรอยร้าวที่มากที่สุดที่ยอมให้ได้ หน่วยเป็น มม.
w/b	หมายถึง	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนัก
X_c	หมายถึง	ความลึกคาร์บอเนชั่นวัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ หน่วยเป็น มม.
X	หมายถึง	ระยะทางจากแนวชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดิน หน่วยเป็นเมตร แต่ไม่เกิน 1,000 เมตร
γ	หมายถึง	ตัวประกอบปัจจัยภูมิประเทศ
α	หมายถึง	สัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม
α_{fa}	หมายถึง	สัมประสิทธิ์ผลการใช้เถ้าลอยสำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์

ρ_c	หมายถึง	หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต หน่วยเป็น กก./ลบ.ม.
α_1	หมายถึง	สัมประสิทธิ์การสัมผัสความเปียกชื้นที่มีผลต่อความลึกคาร์บอเนชั่น
α_2	หมายถึง	สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อความลึกคาร์บอเนชั่น
$\varepsilon_{TS}(t,t_0)$	หมายถึง	ค่าการหดตัวรวมของคอนกรีตระหว่างอายุ t_0 ถึง t หน่วยเป็น ไมโครสเตรน หรือ $x10^{-6}$
$\varepsilon_{as}(t,t_0)$	หมายถึง	ค่าการหดตัวออโตจีนัสของคอนกรีตระหว่างอายุ t_0 ถึง t หน่วยเป็น ไมโครสเตรน หรือ $x10^{-6}$
$\varepsilon_{ds}(t,t_0)$	หมายถึง	ค่าการหดตัวแห้งของคอนกรีตระหว่างอายุ t_0 ถึง t หน่วยเป็น ไมโครสเตรน หรือ $x10^{-6}$
$\varepsilon_{as}(t)$	หมายถึง	ค่าการหดตัวออโตจีนัสที่อายุที่พิจารณาของคอนกรีต หน่วยเป็น ไมโครสเตรน หรือ $x10^{-6}$
$\varepsilon_{as}(t_0)$	หมายถึง	ค่าการหดตัวออโตจีนัสที่อายุของคอนกรีตที่เริ่มสัมผัสกับอากาศ หน่วยเป็น ไมโครสเตรน หรือ $x10^{-6}$
ε_{asm}	หมายถึง	ค่าการหดตัวออโตจีนัสสูงสุดของคอนกรีต หน่วยเป็น ไมโครสเตรน หรือ $x10^{-6}$
ε_{dsm}	หมายถึง	ค่าการหดตัวแห้งสูงสุดของคอนกรีต หน่วยเป็น ไมโครสเตรน หรือ $x10^{-6}$
ε_R	หมายถึง	ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลของการดูดซึมของหิน
$\beta(t,t_0)$	หมายถึง	ค่าสัมประสิทธิ์ที่อายุวันที่พิจารณาระหว่างอายุ t_0 ถึง t
γ_T	หมายถึง	ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลจากอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม
γ_{FA}	หมายถึง	ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลของเถ้าลอย
γ_{LP}	หมายถึง	ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลของผงหินปูน
γ_n	หมายถึง	ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลของปริมาณมวลรวม
$\gamma_{\varphi R}$	หมายถึง	ค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวของหินต่อการหดตัวของคอนกรีต
γ_{SR}	หมายถึง	ค่าสัมประสิทธิ์พื้นที่ผิวจำเพาะของหินต่อการหดตัวของคอนกรีต
r_{FA}	หมายถึง	อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยโดยน้ำหนัก
r_{LP}	หมายถึง	อัตราส่วนการแทนที่ด้วยผงหินปูนโดยน้ำหนัก
n	หมายถึง	อัตราส่วนของมวลรวมโดยปริมาตรในส่วนผสม
φ_R	หมายถึง	การดูดซึมน้ำของหิน หน่วยเป็น ร้อยละ
S_R	หมายถึง	ผลรวมพื้นที่ผิวจำเพาะภายนอกของหินที่นำมาผสมคอนกรีต หน่วยเป็น ตร.ซม./กก.
K_T	หมายถึง	ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลจากอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

K_{FA} หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลของเถ้าลอย

K_{LP} หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลของผงหินปูน

K_{CU} หมายถึง สัมประสิทธิ์สำหรับวิธีการบ่มและระยะเวลาการบ่ม

K_{n} หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลของปริมาณมวลรวม

$K_{\varphi R}$ หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวของหินต่อการหดตัวของคอนกรีต

K_{SR} หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์พื้นที่ผิวจำเพาะของหินต่อการหดตัวของคอนกรีต

$\%SO_{3f}$ หมายถึง ปริมาณร้อยละของ SO_3 ในเถ้าลอย หน่วยเป็น ร้อยละ

ส่วนที่ 3 สมบัติของคอนกรีตเมื่อพิจารณาเรื่องความคงทน

3.1 สถานะของคอนกรีต

3.1.1 คอนกรีตสด หมายถึง คอนกรีตหลังจากการผสมแล้วจนถึงช่วงเสร็จสิ้นการเทคอนกรีตเข้าแบบแล้ว

3.1.2 คอนกรีตในสถานะพลาสติก หมายถึง คอนกรีตหลังจากเสร็จสิ้นการเทจนถึงช่วงเวลาที่คอนกรีตก่อตัวขั้นสุดท้าย

3.1.3 คอนกรีตอายุต้น หมายถึง คอนกรีตหลังจากการก่อตัวขั้นสุดท้ายจนถึงช่วงเวลาก่อนที่คอนกรีตจะพัฒนากำลังรับแรงได้ถึงค่ากำลังที่ออกแบบไว้

3.1.4 คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว หมายถึง คอนกรีตหลังจากพัฒนากำลังได้ถึง หรือเกินค่ากำลังที่ออกแบบไปแล้วและต้องคงทนเป็นเวลายาวนานในสภาวะแวดล้อม

3.2 สมบัติของคอนกรีตในสถานะต่างๆ

3.2.1 คอนกรีตสด

คอนกรีตสดควรมีความสามารถในการเทได้และเติมเต็มเข้าแบบได้ดี มีค่าการสูญเสียความสามารถในการเทได้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ความสามารถในการเทได้ที่ดี หมายถึง

(ก) มีความสามารถในการเทได้ หรือการไหล ที่เหมาะสมกับการก่อสร้างนั้นๆ

(ข) ไม่แยกตัว

(ค) ไม่เกิดการติดขัดเนื่องจากหินกองรวมกันที่ส่วนหนึ่งส่วนใดของแบบหรือเหล็กเสริมในระหว่างเท

3.2.2 คอนกรีตในสถานะพลาสติก

คอนกรีตในสถานะพลาสติก ควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

(ก) ไม่มีการเยิ้มน้ำ หรือมีเพียงเล็กน้อย

(ข) ไม่มีการทรุดตัวแบบพลาสติก หรือมีเพียงเล็กน้อย

(ค) ไม่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวพลาสติก

(ง) แต่งผิวง่าย

3.2.3 คอนกรีตอายุต้น

คอนกรีตอายุต้น ควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

(ก) ไม่มีการหดตัวออโตจีนัสที่มากเกินไป โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาการแตกร้าวเนื่องมาจากหน่วยแรงยึดรั้งที่มีสาเหตุมาจากการหดตัวออโตจีนัส

(ข) ไม่มีการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ

(ค) มีกำลังอัดที่อายุต้นเพียงพอ

3.2.4 คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วควรมีสมบัติตามที่ต้องการในระยะยาว สมบัติดังกล่าว ได้แก่

(ก) สมบัติทางกล

สมบัติทางกล ได้แก่ กำลังอัดและโมดุลัสยืดหยุ่น คอนกรีตควรมีกำลังอัดมากพอที่จะรับหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบไว้โดยมีตัวคูณความปลอดภัยที่เหมาะสม โมดุลัสยืดหยุ่นไม่ควรมีค่าน้อยกว่าที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้าง

(ข) สมบัติด้านความคงทน

คุณลักษณะด้านความคงทนของคอนกรีตสำหรับอายุการใช้งานในระยะยาวขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่คอนกรีตจะต้องเผชิญ คอนกรีตจะต้องถูกออกแบบให้มีคุณภาพสูง มีการซึมผ่านของสารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตหรือเหล็กเสริมต่ำ และมีระยะหุ้มเหล็กเสริมที่เพียงพอในการเผชิญกับสภาพแวดล้อมชนิดและระดับต่าง ๆ เพื่อให้คอนกรีตมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพในสภาพแวดล้อมของการใช้งานและสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ โดยพิจารณาตามหัวข้อต่อไปนี้

1) การขยายตัวในสภาวะเปียก

คอนกรีตต้องไม่ขยายตัวมากเกินไปในสภาวะเปียก ค่าการขยายตัวที่ได้จากการทดสอบมาตรฐานต้องมีค่าไม่สูงจนก่อให้เกิดผลเสียต่อองค์อาคารที่ติดกัน ค่าการขยายตัว (คิดเป็นร้อยละของความยาวของชิ้นทดสอบเริ่มต้น) ของชิ้นทดสอบที่ได้จากการทดสอบมาตรฐานต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนด ในระยะเวลาที่กำหนด

2) การหดตัวแห้ง

คอนกรีตต้องไม่หดตัวมากเกินไปจนก่อให้เกิดรอยร้าวที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ค่าการหดตัวของคอนกรีตต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนด ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของการยึดรั้ง กำลังรับแรงดึง หรือความต้านทานการแตกร้าวของคอนกรีต และสมบัติของคอนกรีตอื่นๆ เช่น การล้า เป็นต้น

3) คาร์บอเนชั่น

ความลึกคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตมาตรฐานทดสอบโดยวิธีเร่ง (standard accelerated test) ต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนด ค่าดังกล่าวกำหนดโดยที่ความลึกคาร์บอเนชั่นต้องไม่เข้าไปถึงตำแหน่งเหล็กเสริมชั้นนอกสุดก่อนอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมที่ได้ออกแบบไว้

4) การเกิดสนิมของเหล็กเสริม

คอนกรีตควรมีการซึมผ่านต่ำเพื่อจำกัดการเข้าไปของน้ำ ก๊าซ สารละลาย และอิออน เพื่อเป็นการป้องกันเหล็กเสริมในคอนกรีต ซึ่งอาจประเมินการซึมผ่านโดยการใช้การทดสอบค่าการซึมผ่านของน้ำหรือการซึมผ่านของคลอไรด์ ค่าการซึมผ่านของน้ำหรือการซึมผ่านของคลอไรด์ต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนด ค่าการซึมผ่านของน้ำที่กำหนดอาจเปลี่ยนแปลงได้ตามระยะหุ้มเหล็กเสริม คอนกรีตที่มีระยะหุ้มมาก อาจกำหนดค่าการซึมผ่านที่ยอมให้สูงขึ้น การกำหนดค่าต้องคำนึงถึงปริมาณคลอไรด์ด้วย โดยปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด ณ ตำแหน่งเหล็กเสริมชั้นนอกสุดต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนด

5) ปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวม

คอนกรีตต้องไม่มีความเสี่ยงต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างด่างกับซิลิก้า ด่างกับซิลิเกต หรือด่างกับคาร์บอเนต หากมีความเสี่ยงต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวม ปริมาณด่างในปูนซีเมนต์ต้องไม่สูงเกินกว่าที่กำหนด หากสูงเกินกว่าที่กำหนดควรใช้วัสดุประสานชนิดอื่นร่วมด้วย เช่น เถ้าลอย เป็นต้น เพื่อลดความเป็นด่างในคอนกรีต

6) การสึกกร่อน

คอนกรีตไม่ควรสึกกร่อนมากถึงขั้นรุนแรงในช่วงอายุการใช้งานที่ออกแบบไว้ ควรมีวิธีการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนของคอนกรีต ข้อกำหนดในเรื่องการสึกกร่อนของคอนกรีตขึ้นอยู่กับชนิดขององค์อาคารหรือโครงสร้าง และสภาวะแวดล้อมที่คอนกรีตต้องเผชิญ

7) การเผชิญกับซัลเฟต

คอนกรีตต้องมีความต้านทานซัลเฟต ค่าการขยายตัว (ร้อยละของความยาวของชิ้นทดสอบเริ่มต้น) และ/หรือค่าการสูญเสียน้ำหนัก ของชิ้นทดสอบที่ได้จากการทดสอบการขยายตัว และ/หรือการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากซัลเฟตตามวิธีการมาตรฐาน (standard sulfate expansion or weight loss test) ต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนด ในระยะเวลาที่กำหนด

8) การเผชิญกับสารเคมีอื่นๆ

คอนกรีตต้องทนต่อการกัดกร่อนโดยสารเคมีอื่น เช่น กรด และ เกลือ ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้นต้องไม่เกินกว่าที่กำหนด ในระยะเวลาที่กำหนด

9) การแข็งตัวและหลอมละลายของน้ำในคอนกรีต

คอนกรีตต้องสามารถทนต่อรอบการแข็งตัวและหลอมละลายของน้ำในคอนกรีตได้โดยที่ค่าโมดุลัสยืดหยุ่นลดลงไม่เกินกว่าร้อยละที่กำหนดเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น

10) การเสื่อมสภาพโดยกระบวนการทางชีววิทยา

ร้อยละของการสูญเสียกำลังอัดเทียบกับกำลังอัดเมื่อเริ่มทดสอบ โดยทดสอบด้วยวิธีเร่ง (specified accelerated degradation test) ต้องไม่เกินกว่าที่กำหนด

3.3 คอนกรีตในสภาพแวดล้อมต่างๆ

ในอดีตที่ผ่านมาการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก มีการกำหนดข้อกำหนดของคอนกรีตเป็นลักษณะเดียวกัน แม้ว่าสภาพแวดล้อมของโครงสร้างจะมีความแตกต่างกัน ทำให้โครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงมีอายุการใช้งานสั้นลง ซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และซ่อมแซมสูง หากสามารถกำหนดสมบัติของคอนกรีตโดยให้มีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างจะต้องเผชิญ ก็จะทำให้คอนกรีตมีอายุการใช้งานยาวนาน ลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และซ่อมแซมในอนาคต ดังนั้น ในการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้พิจารณาถึงปัญหาด้านความคงทนที่จะต้องเผชิญในแต่ละลักษณะสภาวะแวดล้อม ดังในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของคอนกรีตที่ต้องคำนึงถึงตามลักษณะงานก่อสร้างและสภาพแวดล้อมของโครงสร้าง

(ข้อ 3.3)

ลักษณะงานก่อสร้างและสภาพแวดล้อม	การออกแบบให้คำนึงถึงหัวข้อความคงทนต่อไปนี้เป็นหลัก
1. น้ำจืด	
ก) ใต้น้ำ	การสึกกร่อนของผิวคอนกรีต
ข) เผชิญวัฏจักรเปียกสลับแห้ง	การเกิดสนิมของเหล็กเสริม และ/หรือ การสึกกร่อนของผิวคอนกรีต
ค) บรรยากาศบริเวณที่สัมผัสละอองน้ำได้	การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอเนชั่น และ/หรือ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมทั่วไป
2. น้ำกร่อย	
ก) ใต้น้ำ	การต้านทานซัลเฟต และ/หรือ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์จากน้ำทะเล และ/หรือ การสึกกร่อนของผิวคอนกรีต
ข) เผชิญวัฏจักรเปียกสลับแห้ง	การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์จากน้ำทะเล และ/หรือการสึกกร่อนของผิวคอนกรีต
ค) บรรยากาศบริเวณที่สัมผัสละอองน้ำได้	การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอเนชั่น และ/หรือ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์จากน้ำทะเล
3. น้ำทะเล	
ก) ใต้น้ำ	การต้านทานซัลเฟต และ/หรือ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์จากน้ำทะเล และ/หรือ การสึกกร่อนของผิวคอนกรีต
ข) เผชิญวัฏจักรเปียกสลับแห้ง	การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์จากน้ำทะเล และ/หรือการสึกกร่อนของผิวคอนกรีต
ค) บรรยากาศบริเวณที่สัมผัสละอองน้ำได้	การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอเนชั่น และ/หรือ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์จากน้ำทะเล
4. น้ำเสีย	การต้านทานกรดซัลฟุริก และ การต้านทานซัลเฟต หรือสารเคมีอื่นๆ
5. ใต้ดิน และใต้พื้นท้องทะเล	
ก) มีซัลเฟต	การต้านทานซัลเฟต
ข) ไม่มีซัลเฟต	ไม่มี

ตารางที่ 1 (ต่อ) สมบัติของคอนกรีตที่ต้องคำนึงถึงตามลักษณะงานก่อสร้างและสภาพแวดล้อมของโครงสร้าง

(ข้อ 3.3)

ลักษณะงานก่อสร้างและสภาพแวดล้อม	การออกแบบให้คำนึงถึงหัวข้อความคงทนต่อไปนี้เป็นหลัก
6. ติดผิวดิน (เช่น ตอม่อ คานคอดิน โครงสร้างบริเวณติดผิวดิน) ก) สัมผัสคลอไรด์ ข) ไม่สัมผัสคลอไรด์	 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ในดิน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมทั่วไป
7. ในบรรยากาศที่ต้องสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ใกล้โรงงาน ใกล้ถนนที่มีการจราจรหนาแน่น อุโมงค์ทางลอด)	การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอเนชั่น
8. ในบรรยากาศที่ต้องคำนึงถึงการหดตัวแห้ง (กลางแจ้ง หรือ มีลมพัดแรง)	การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแห้ง
9. โครงสร้างคอนกรีตหลา เช่น เขื่อน ฐานราก ขนาดใหญ่ และโครงสร้างที่มีความหนามาก	การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ หรือ การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว
10. ชิ้นส่วนบางต่อเนื่องที่มีการยึดรั้ง	การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว
11. โครงสร้างคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ มีความทึบน้ำสูง	การหดตัวออโตจีนัส
12. งานก่อสร้างที่สัมผัสสารเคมีอื่น	ความสามารถในการต้านทานสารเคมีที่เกี่ยวข้อง

ข้อแนะนำ

หากโครงสร้างคอนกรีตได้รับการปกป้องพื้นผิวในด้านที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างดี และวัสดุปกป้องพื้นผิวนั้นได้รับการดูแลรักษาที่เหมาะสมในช่วงการใช้งานโครงสร้าง จะทำให้โครงสร้างคอนกรีตที่ได้รับการปกป้องพื้นผิวนั้นมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ยกเว้นการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิของคอนกรีตหลา ที่ไม่อาจป้องกันได้ด้วยวิธีการเคลือบผิวคอนกรีต (ลำดับที่ 9 ในตารางที่ 1)

3.4 อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมขั้นต่ำของโครงสร้างคอนกรีต

อาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแต่ละประเภทมีความสำคัญและส่งผลกระทบในเชิงสังคมและเศรษฐกิจแตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากต้องปิดการใช้อาคารเพื่อการซ่อมแซม ตัวอย่างโครงสร้างที่มีผลต่อระบบเศรษฐกิจมาก ได้แก่ เขื่อน สนามบิน โรงไฟฟ้า ทางด่วน โครงสร้างระบบขนส่งมวลชน และสะพานขนาดใหญ่ เป็นต้น นอกจากนี้แหล่งเงินงบประมาณในการก่อสร้างและซ่อมแซมบำรุงรักษาก็มีที่มาที่แตกต่างกัน เช่น อาคาร

หน่วยงานของรัฐที่มาจากเงินภาษีอากรของประชาชน อาคารของเอกชนที่เจ้าของอาคารต้องรับผิดชอบค่าใช้จ่ายเอง เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้การออกแบบอายุการใช้งานให้แก่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความเหมาะสมต่อลักษณะสภาพการใช้งานอาคารของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและสภาพทางเศรษฐกิจของประเทศไทย จึงกำหนดข้อแนะนำอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมขั้นต่ำสำหรับอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าแนะนำอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมขั้นต่ำของอาคาร โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทต่าง ๆ

(ข้อ 3.4)

ประเภทของอาคาร	อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมขั้นต่ำ (ปี)
1. อาคารที่จำเป็นต่อความเป็นอยู่ของสาธารณชนและอาคารสาธารณูปโภคขนาดใหญ่ เช่น อาคารศูนย์บรรเทาสาธารณภัย อาคารศูนย์สื่อสาร ท่าอากาศยาน โรงไฟฟ้า โรงผลิตและเก็บน้ำประปา เขื่อน อ่างเก็บน้ำ	50
2. โครงสร้างทางด้านการคมนาคมขนาดใหญ่ เช่น สะพานข้ามแม่น้ำขนาดใหญ่ ทางด่วน	40
3. โครงสร้างทางด้านการคมนาคมขนาดเล็ก เช่น สะพานข้ามคลอง สะพานข้ามแยก	30
4. อาคารสูง อาคารขนาดใหญ่พิเศษ อาคารชุมนุมคน อาคารชุด โรงแรมที่มีห้องพักตั้งแต่ 80 ห้องขึ้นไป	20
5. อาคารสถานที่ราชการทุกประเภท	20
6. อาคารสำนักงาน โรงมหรสพ สถานบริการ โรงงาน สถานศึกษา โรงแรมที่มีห้องพักน้อยกว่า 80 ห้อง	20
7. อาคารเพื่อการพักอาศัยที่สร้างขึ้นสำหรับจำหน่าย เช่น หมู่บ้านจัดสรร อาคารพาณิชย์ เป็นต้น	20
8. อาคารที่เจ้าของสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการพักอาศัยเอง	ไม่กำหนด
9. อาคารที่ไม่ใช่เพื่อการพักอาศัย เช่น ป้ายโฆษณา	ไม่กำหนด

ข้อแนะนำ

ค่าที่ให้ในตารางที่ 2 นี้เป็นค่าแนะนำ ผู้ออกแบบและเจ้าของอาคารสามารถกำหนดให้อาคารมีอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมมากกว่าหรือน้อยกว่าที่แนะนำในตารางที่ 2 นี้ได้ โดยปกติอายุการใช้งานจะถูกกำหนดตามความประสงค์ของเจ้าของอาคาร

ส่วนที่ 4 ข้อกำหนดทั่วไปในการออกแบบเมื่อพิจารณาด้านความคงทน

4.1 ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด

ในการออกแบบคอนกรีตเพื่อให้คอนกรีตมีความคงทนต่อการเสื่อมสภาพและสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะต้องมีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่าระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด ซึ่งระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุดสามารถคำนวณได้จากสมการ (4.1-ก) และ (4.1-ข) ต่อไปนี้

$$c \geq c_{\min} \qquad (4.1\text{-ก})$$

$$c_{\min} = \alpha \cdot c_0 \qquad (4.1\text{-ข})$$

โดยที่ c_0 ค่าแนะนำสำหรับระยะหุ้มเหล็กเสริม ดูตารางที่ 4 ตารางที่ 5 และ ตารางที่ 21

α ขึ้นอยู่กับคุณภาพของคอนกรีต หรือกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ ดูตารางที่ 3

$c_{\min}$ ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุดที่จำเป็นต้องใช้เพื่อให้คงทน สำหรับทุกสภาพสิ่งแวดล้อม

c ค่าที่ได้จากการคำนวณให้ปัดเศษทศนิยมขึ้นเป็นจำนวนเต็มครั้งละ 5 มม.

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม (α)

(ข้อ 4.1)

ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) หรือ กำลังอัดประลัย (f_c') ทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน	**ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม**
$w/b \geq 0.65$ หรือ $f_c' \leq 20$ เมกาปาสกาล	1.2
$0.45 \leq w/b < 0.65$ หรือ 20 เมกาปาสกาล $< f_c' \leq 40$ เมกาปาสกาล	1.0
$w/b < 0.45$ หรือ $f_c' > 40$ เมกาปาสกาล	0.9*
หมายเหตุ *กรณีที่ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไปไม่เกิน 20 มม. หรือกรณีที่ต้องเผชิญกับกรดหรือเผชิญกับสภาวะซัลเฟตตั้งแต่ระดับปานกลางขึ้นไป ให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 1.0	

ตารางที่ 4 ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (c_0) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป

(ข้อ 4.1)

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด (มม.)
1. คอนกรีตหล่อในที่ (ไม่อัดแรง)	
(ก) คอนกรีตที่หล่อติดกับดินโดยใช้ดินเป็นแบบ และผิวคอนกรีตสัมผัสกับดินตลอดเวลาที่ใช้งาน	75
(ข) คอนกรีตที่สัมผัสกับดิน หรือถูกแดดฝน	
สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 16 มม.	50
สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. และเล็กกว่า	40
(ค) คอนกรีตที่ไม่สัมผัสดิน หรือไม่ถูกแดดฝน	
ในผนัง แผ่นพื้น และตง	
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป	40
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มม. และเล็กกว่า	20
ในคาน และเสา	
- เหล็กเสริมหลัก เหล็กลูกตั้ง	30
- เหล็กปลอกเดี่ยวหรือปลอกเกลียว	35
คอนกรีตเปลือกบางและพื้นแผ่นพับ	
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 20 มม. ขึ้นไป	20
-สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. และเล็กกว่า	15
2. คอนกรีตหล่อในที่ (อัดแรง)	
(ก) คอนกรีตที่หล่อติดกับดินโดยใช้ดินเป็นแบบ และผิวคอนกรีตสัมผัสกับดินตลอดเวลาที่ใช้งาน	75
(ข) คอนกรีตที่สัมผัสดิน หรือถูกแดดฝน	
ในผนัง แผ่นพื้น และตง	25
ในองค์อาคารอื่น	38
(ค) คอนกรีตที่ไม่สัมผัสดิน หรือไม่ถูกแดดฝน	
ในผนัง แผ่นพื้น และตง	20
ในคาน และเสา	
- เหล็กเสริมหลัก เหล็กลูกตั้งในเสา	38
- เหล็กปลอกเดี่ยวหรือเหล็กปลอกเกลียว	25

ตารางที่ 4 (ต่อ) ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (c_0) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป

(ข้อ 4.1)

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด (มม.)
คอนกรีตเปลือกบางและพื้นแผ่นพับ	
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. ขึ้นไป	เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางระบุ แต่ไม่น้อยกว่า 20 มม.
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. และเล็กกว่า	10
3. คอนกรีตหล่อสำเร็จ (ควบคุมคุณภาพจากโรงงาน) ทั้งอัดแรงและไม่อัดแรง	
(ก) คอนกรีตที่สัมผัสดิน หรือถูกแดดฝน	
ในแผ่นผนัง	
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป	40
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มม. และเล็กกว่า	20
ในองค์อาคารอื่น	
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป	50
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 19 มม. ถึง 36 มม.	40
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 16 มม. และเล็กกว่า	30
(ข) คอนกรีตที่ไม่สัมผัสดิน หรือไม่ถูกแดดฝน	
ในผนัง แผ่นพื้น และตง	
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป	35
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มม. และเล็กกว่า	15
ในคาน และเสา	
- เหล็กเสริมหลัก เหล็กลูกตั้งในเสา	25
- เหล็กลูกตั้ง เหล็กปลอกเดี่ยวหรือเหล็กปลอกเกลียว	30
คอนกรีตเปลือกบางและพื้นแผ่นพับ	
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 20 มม. ขึ้นไป	15
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. และเล็กกว่า	10
4. คอนกรีตที่หล่อในน้ำ	100
5. เหล็กเสริมมัดรวมกันเป็นกำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเส้นเดียวซึ่งมีเนื้อที่หน้าตัดเท่ากับเหล็กทั้งกำรวมกัน แต่ไม่จำเป็นต้องมากกว่า 50 มม. ยกเว้นกรณีคอนกรีตที่สัมผัสดิน ระยะหุ้มต่ำสุดต้องเท่ากับ 75 มม.	

ตารางที่ 5 ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (c_0) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

(ข้อ 4.1)

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด (มม.)
1. คอนกรีตหล่อในที่ ทั้งอัดแรงและไม่อัดแรง	
แผ่นพื้น และผนัง	50
องค์อาคารอื่น	65
2. คอนกรีตหล่อสำเร็จ (ควบคุมคุณภาพจากโรงงาน) ทั้งอัดแรงและไม่อัดแรง	
แผ่นพื้น และผนัง	40
องค์อาคารอื่น	50

ข้อแนะนำ

วิศวกรผู้ออกแบบไม่สามารถกำหนดระยะหุ้มเหล็กเสริมให้น้อยกว่า $c_{\min}$ แต่สามารถกำหนดระยะหุ้มเหล็กเสริมให้มากกว่าค่า $c_{\min}$ นี้ได้ ขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานที่ต้องการ ซึ่งระยะหุ้มเหล็กเสริมที่เหมาะสมตามอายุการใช้งานสามารถคำนวณได้จากหัวข้อที่ 5.1 สำหรับสภาพแวดล้อมคลอไรด์ และ 5.2 สำหรับสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชั่น

4.2 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด

โดยปกติจะกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตตามต้องการ แต่สำหรับลักษณะงานก่อสร้างและสภาพแวดล้อมดังที่กำหนดในหัวข้อ 3.3 เพื่อให้คอนกรีตมีความคงทนต่อการเสื่อมสภาพและสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ จำเป็นต้องกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้ต่ำ ถึงแม้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จะสูงกว่ากำลังอัดที่ต้องการในการรับน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบก็ตาม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุดให้เป็นไปตามข้อกำหนดดังตารางที่ 6

ข้อแนะนำ

(1) วิศวกรผู้ออกแบบสามารถกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้ต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าที่กำหนดในหัวข้อนี้ได้ โดยสามารถคำนวณได้จากหัวข้อที่ 5.1 สำหรับสภาพแวดล้อมคลอไรด์ และ 5.2 สำหรับสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชั่น

(2) สภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมระดับปานกลาง ได้แก่ สภาพแวดล้อมที่เสี่ยงต่อคาร์บอเนชั่นรุนแรง (ดูหัวข้อที่ 5.2) หรือสภาพแวดล้อมคลอไรด์ที่อยู่ห่างจากชายฝั่งตั้งแต่ 100 ม. จนถึง 1,000 ม. (ดูหัวข้อที่ 5.1)

(3) สภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมระดับรุนแรง ได้แก่ สภาพแวดล้อมคลอไรด์ที่อยู่ห่างจากชายฝั่งไม่เกิน 100 ม. (ดูหัวข้อที่ 5.1)

(4) สภาวะที่เสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพของคอนกรีตระดับปานกลาง ได้แก่ สภาพแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนโดยสารละลายซัลเฟตระดับปานกลาง (ดูหัวข้อที่ 7)

(5) สภาวะที่เสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพของคอนกรีตระดับรุนแรง ได้แก่ สภาพแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนโดยสารละลายซัลเฟตระดับรุนแรง (ดูหัวข้อที่ 7)

ตารางที่ 6 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด

(ข้อ 4.2)

คอนกรีตในสภาวะต่างๆ	**อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด**
1. โครงสร้างคอนกรีตที่ต้องการความทึบน้ำ	0.50
2. โครงสร้างคอนกรีตในสภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมหรือการเสื่อมสภาพของคอนกรีต ระดับปานกลาง	0.50
3. โครงสร้างคอนกรีตในสภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมหรือการเสื่อมสภาพของคอนกรีต ระดับรุนแรง	0.45

4.3 ความกว้างรอยร้าวมากที่สุดที่ยอมรับได้

ในบางโอกาส องค์อาคารบางประเภท เช่น คาน อาจไม่สามารถหลีกเลี่ยงรอยร้าวดังเช่น รอยร้าวที่เกิดจากโมเมนต์ดัดได้ ซึ่งรอยร้าวเหล่านี้มักไม่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงขององค์อาคารถ้าองค์อาคารนั้นไม่ได้มีการเสื่อมสภาพ อย่างไรก็ดี รอยร้าวที่มีความกว้างมากก็จะเป็นผลให้สารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตและเหล็กเสริมซึมผ่านเข้าไปได้ง่าย ทำให้องค์อาคารนั้นเสื่อมสภาพเร็วขึ้น และมีอายุการใช้งานสั้นลง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องควบคุมขนาดความกว้างของรอยร้าวไม่ให้มากเกินไป ความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุด สำหรับโครงสร้างในสภาพแวดล้อมทั่วไป หรือในสภาพแวดล้อมที่เผชิญต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม สามารถกำหนดได้จากตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ความกว้างรอยร้าวมากที่สุดที่ยอมรับได้

(ข้อ 4.3)

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	**เหล็กเสริมทั่วไป (มม.)**	**เหล็กเสริมอัดแรง (มม.)**
1. สภาวะทั่วไป	$0.005 \times c$	$0.004 \times c$
2. สภาวะเสี่ยงต่อการเกิดสนิมปานกลาง	$0.004 \times c$	ห้ามมีรอยร้าว
3. สภาวะเสี่ยงต่อการเกิดสนิมรุนแรง	$0.0035 \times c$	ห้ามมีรอยร้าว
หมายเหตุ หากระยะหุ้มเหล็กเสริม (c) เกิน 100 มม. ให้ใช้ค่า 100 มม. ในการคำนวณหาความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุด		

ข้อแนะนำ

1. วิศวกรผู้ออกแบบสามารถเลือกกำหนดขนาดความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุดให้ต่ำกว่าค่าในตารางที่ 7 ได้หากต้องการให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น
2. สภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมระดับปานกลาง ได้แก่ สภาพแวดล้อมคาร์บอเนชั่นที่เสี่ยงต่อคาร์บอเนชั่นรุนแรง หรือสภาพแวดล้อมคลอไรด์ที่อยู่ห่างจากชายฝั่งตั้งแต่ 100 ม. จนถึง 1,000 ม.
3. สภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมระดับรุนแรง ได้แก่ สภาพแวดล้อมคลอไรด์ที่อยู่ห่างจากชายฝั่งน้อยกว่า 100 ม.

4.4 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ยอมให้ในส่วนผสมคอนกรีต

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยอิออนของคลอไรด์ (chloride ions) เป็นตัวการที่ทำให้ความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมลดลง และเมื่อปริมาณคลอไรด์บริเวณเหล็กเสริมถึงระดับวิกฤตแล้ว ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในทรายจากแหล่งใกล้ทะเล) หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว ดังนั้นเพื่อเป็นการควบคุมปริมาณคลอไรด์ตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตคอนกรีต จึงควรกำหนดมาตรฐานไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่มาจากส่วนผสมแต่ละชนิด (ไม่รวมที่ซึมผ่านเข้ามาจากสิ่งแวดล้อม) โดยจะต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนดในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ยอมให้ในส่วนผสมคอนกรีต

(ข้อ 4.4)

ลักษณะงานก่อสร้าง	ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด ที่ยอมให้ในส่วนผสมคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)
1. คอนกรีตอัดแรง	0.08
2. คอนกรีตเสริมเหล็กที่ขณะใช้งานมีการสัมผัสกับคลอไรด์ เช่น กำแพงกันคลื่น (sea-retaining walls)	0.20
3. คอนกรีตเสริมเหล็กที่มีสภาพแห้ง หรือขณะใช้งานมีการป้องกันความชื้น	1.00
4. คอนกรีตเสริมเหล็กอื่น	0.30
หมายเหตุ การทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายในกรดได้ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1152/C1152M : standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete	

ข้อแนะนำ

ในทางปฏิบัติสามารถทดสอบวัดปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ยอมให้ในส่วนผสมคอนกรีต เมื่ออยู่ในสภาวะคอนกรีตสดโดยทดสอบในขณะเดียวกับการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด หรือเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วตามมาตรฐาน ASTM C1152/C1152M กำหนด หรือคำนวณจากผลรวมของปริมาณคลอไรด์ในวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีตก็ได้

ส่วนที่ 5 การออกแบบเมื่อพิจารณาการเกิดสนิม

5.1 การเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมทะเล

เมื่อคอนกรีตเผชิญต่อคลอไรด์ในสภาพแวดล้อม คลอไรด์จะแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีต หากปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต ณ ตำแหน่งเหล็กเสริมมีมากเกินกว่าค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตจะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเป็นสนิมได้ ตัวอย่างของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ เช่น โครงสร้างริมทะเลบริเวณน้ำขึ้นน้ำลงหรือบริเวณสัมผัสคลื่นและละอองคลื่น โครงสร้างใกล้ทะเลหรือต้องเผชิญกับลมทะเล และโครงสร้างบนผิวดินที่มีคลอไรด์ เป็นต้น

ดังนั้น การทำให้คอนกรีตมีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ คอนกรีตจะต้องถูกออกแบบให้ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต ณ ตำแหน่งผิวเหล็กเสริม (C_d) มีค่าไม่เกินค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต ($C_{\lim}$) ที่จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมได้ ภายในช่วงอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซม (repair-free service life) ดังแสดงในสมการ (5.1-ก)

$$C_d \le C_{\lim} \qquad (5.1\text{-ก})$$

โดยที่ $C_{\lim}$ ขึ้นอยู่กับประเภทและสัดส่วนของวัสดุประสานที่ใช้ โดยกำหนดให้มีค่าดังตารางที่ 9 หน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

C_d สามารถคำนวณได้จากสมการ (5.1-ข) หน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

$$C_d = (C_s - C_0)\left[1 - erf\left(\frac{c}{2\sqrt{D_a t_r}}\right)\right] + C_0 \qquad (5.1\text{-ข})$$

โดยที่ c ระยะหุ้มเหล็กเสริม ได้จากการคำนวณทางวิศวกรรมโครงสร้าง และจากหัวข้อ 4.1 ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุดในมาตรฐานฉบับนี้ โดยระยะหุ้มเหล็กเสริมในสมการ (5.1-ข) นี้ให้ใช้หน่วยเป็นเซนติเมตร

C_0 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้เท สามารถหาได้จากการทดสอบวัดปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด หรือจากการคำนวณปริมาณคลอไรด์ในส่วนผสมคอนกรีต โดยต้องมีค่าไม่เกินที่กำหนดในตารางที่ 8 หน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

C_s ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต ได้จากตารางที่ 10 หรือตารางที่ 11 โดยขึ้นอยู่กับสภาพสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ที่โครงสร้างตั้งอยู่ หน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

t_r อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซม กำหนดโดยเจ้าของอาคาร ให้พิจารณาจากประเภทของอาคารดังตารางที่ 2 หน่วยเป็นปี

erf สมการ error function สามารถหาค่าได้โดยใช้ตาราง ก-1 ในภาคผนวก ก

D_a สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต ที่คำนวณได้จากสมการ (5.1-จ) จะถูกใช้ในการกำหนดสัดส่วนผสมคอนกรีต หน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อปี

ตารางที่ 9 ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต

(ข้อ 5.1)

ประเภทของวัสดุประสาน	ปริมาณคลอไรด์วิกฤต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)
ปูนซีเมนต์ล้วน	0.45
ปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูน - ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักผงหินปูนต่อวัสดุประสานไม่เกิน 0.15	0.45
ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย - เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักเถ้าลอยต่อวัสดุประสานน้อยกว่า 0.15 - เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักเถ้าลอยต่อวัสดุประสานตั้งแต่ 0.15 แต่ไม่ถึง 0.35 - เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักเถ้าลอยต่อวัสดุประสานตั้งแต่ 0.35 ถึง 0.50	 0.45 0.35 0.30

หมายเหตุ

1. สำหรับปูนซีเมนต์ที่ผสมทั้งผงหินปูนและเถ้าลอย โดยที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักผงหินปูนต่อวัสดุประสานไม่เกิน 0.15 ให้ใช้ค่าตามปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย
2. ปูนซีเมนต์ หมายรวมถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ตามมาตรฐาน มอก. 15 และปูนซีเมนต์ ตามมาตรฐาน มอก. 2594 ชนิด GU โดยหากเป็นกรณีของปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน มอก. 2594 ชนิด GU ให้รวมปริมาณผงหินปูนในปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน มอก. 2594 ชนิด GU เข้าไปในการคำนวณอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงหินปูนต่อวัสดุประสานด้วย

ตารางที่ 10 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตสำหรับกรณีบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง หรือบริเวณสัมผัสคลื่นและละอองคลื่น

(ข้อ 5.1)

กรณีบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (tidal zone) หรือบริเวณสัมผัสคลื่นและละอองคลื่น (splash zone)

ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต, C_s (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) คำนวณได้จากสมการ (5.1-ค) โดยเป็นสมการสำหรับแปลงหน่วยของปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต, C_s' จากร้อยละโดยน้ำหนักคอนกรีต เป็นร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

$$C_s = C_s' \times \frac{\rho_c}{b} \qquad \text{(5.1-ค)}$$

โดยที่ C_s ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต ขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมของโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องการ หน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของคอนกรีต

ρ_c หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หากไม่ทราบค่าให้ใช้ค่า 2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับคอนกรีตทั่วไป

b น้ำหนักวัสดุประสานในคอนกรีต หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หากไม่ทราบค่า ให้ใช้สมมติค่าที่คาดว่าใกล้เคียงกับที่จะใช้ในส่วนผสมจริง

อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซม (ปี)	ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต, C_s' (ร้อยละโดยน้ำหนักของคอนกรีต)
10	0.971
20	1.233
30	1.391
40	1.504
50	1.592
75	1.754
100	1.869

หมายเหตุ กรณีที่อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมที่ต้องการ มีค่าอยู่ระหว่างค่าที่ระบุในตารางที่ 10 ให้คำนวณโดยวิธีประมาณค่าเชิงเส้นตรง (linear interpolation)

ตารางที่ 11 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตสำหรับกรณีบริเวณบรรยากาศทะเลบนแผ่นดิน

(ข้อ 5.1)

กรณีบริเวณบรรยากาศทะเล (marine atmospheric zone) บนแผ่นดิน
ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต, C_s (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) สามารถหาค่าได้จาก 2 วิธี ดังนี้ 1) คำนวณโดยใช้สมการ (5.1-ง) $$C_s = \left(0.03\left(\gamma C_a\right)^{0.38}\right)\times\left(10\left(1-e^{-0.1t_r}\right)\right)\times\left(1.7E^{-0.3}\right)\times\left(0.55\left(\frac{f}{b}-0.7\right)^2+0.9\right)\times\left(1.2\log\left(\frac{w}{b}\right)+1.4\right) \quad (5.1\text{-ง})$$ โดยที่ C_a อัตราการสะสมของคลอไรด์ในอากาศ (airborne chloride deposition rate) หมายถึง ปริมาณคลอไรด์สะสมจากละอองน้ำทะเลที่ถูกพัดมากับลม คำนวณจากสมการในตารางที่ 12 หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อตารางเมตรต่อวัน (milligram/m^2/day = mmd) γ ตัวประกอบปัจจัยภูมิประเทศ (terrain factor) พิจารณาจากค่าในตารางที่ 13 t_r อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซม (repair-free service life) กำหนดโดยเจ้าของอาคาร หน่วยเป็นปี E ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางถึงตำแหน่งของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องการออกแบบ หน่วยเป็นเมตร f/b อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน ที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต w/b อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต 2) หาค่าจากตารางที่ ก-2 ถึง ก-8 ในภาคผนวก ก (แสดงค่า C_s เฉพาะกรณีที่ความสูง 1 เมตร เหนือระดับน้ำทะเลปานกลางถึงตำแหน่งของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีต และภูมิประเทศไม่มีสิ่งกีดขวางลมทะเลเท่านั้น ซึ่งเป็นกรณีที่มีค่า C_s มากที่สุด หากเป็นกรณีอื่นๆ ให้หาค่า C_s จากวิธีการคำนวณโดยใช้สมการ 5.1-ง) **หมายเหตุ** 1. คอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนไม่เกิน 15% ของวัสดุประสาน ให้ใช้ค่าของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน 2. คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและผงหินปูนโดยที่ปริมาณผงหินปูนไม่เกิน 15% ของวัสดุประสาน ให้ใช้ค่าของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย 3. ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (C_s) สามารถหาค่าจากเว็บแอพพลิเคชั่นผ่านเว็บไซต์ https://thaicorrosionmap.mtec.or.th/static/data/dpt1332.html โดยมีรายละเอียดตามภาคผนวก ค

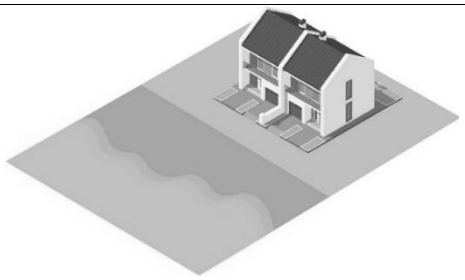
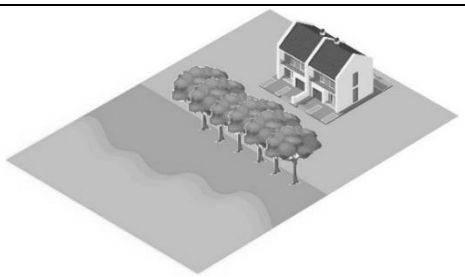
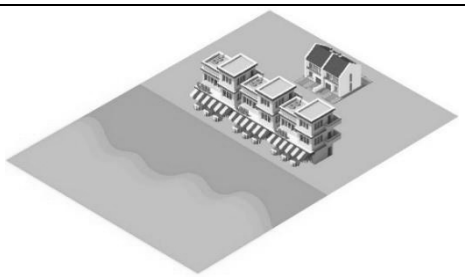
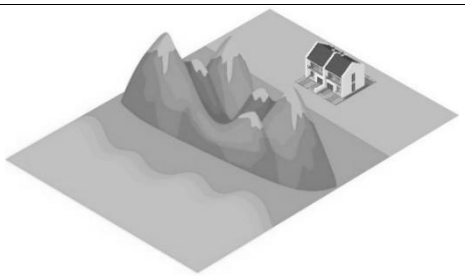
ตารางที่ 12 อัตราการสะสมของคลอไรด์ในอากาศ

(ข้อ 5.1)

ชายฝั่ง	อัตราการสะสมของคลอไรด์ในอากาศ ระยะทาง 0 – 1,000 ม. จากแนวชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดิน
อ่าวไทยตอนบน จากจังหวัดเพชรบุรีถึงจังหวัดตราด	$C_a = 12.79\, e^{-0.00165X}$
ทะเลอันดามัน จากจังหวัดระนองถึงจังหวัดสตูล	$C_a = 198.19\, e^{-0.0078X}$
อ่าวไทยตอนล่าง จากจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ถึงจังหวัดนราธิวาส	$C_a = 485.60\, e^{-0.00536X}$
โดยที่ C_a คือ อัตราการสะสมของคลอไรด์ในอากาศ หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อตารางเมตรต่อวัน X คือ ระยะทางจากแนวชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดิน หน่วยเป็นเมตร แต่ไม่เกิน 1,000 เมตร **หมายเหตุ** การวัดค่าของระยะทางให้วัดเป็นค่าระยะกระจัด (displacement) ไม่ใช่ระยะทางตามถนน	

ตารางที่ 13 ตัวประกอบปัจจัยภูมิประเทศ (γ)

(ข้อ 5.1)

ลักษณะสิ่งกีดขวาง	ตัวอย่างภาพของสิ่งกีดขวาง	ตัวประกอบปัจจัยภูมิประเทศ (γ)
ไม่มีสิ่งกีดขวางลมทะเล		1.0
รั้วเตี้ย		0.9
ต้นไม้		0.8
อาคาร 3 ชั้น		0.3
ภูเขา		0.1
หมายเหตุ หากลักษณะภูมิประเทศแตกต่างไปจากในตารางที่ 13 ให้ประเมินใช้ค่าของตัวประกอบตามลักษณะภูมิประเทศที่ใกล้เคียง		

สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต (apparent chloride diffusion coefficient, D_a) ซึ่งพิจารณาถึงผลของการแตกร้าวของคอนกรีตด้วย สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$D_a = D_k + D_0 \qquad (5.1\text{-จ})$$

$$D_0 = 0.05W \qquad (5.1\text{-ฉ})$$

โดยที่ W ความกว้างรอยร้าวของคอนกรีต (มิลลิเมตร)ได้จากการคำนวณทางวิศวกรรมโครงสร้าง หากไม่ทราบค่าให้ใช้ความกว้างรอยร้าวมากที่สุดที่ยอมรับได้ (ดูตารางที่ 7)

D_0 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์จากผลของรอยร้าวในคอนกรีต (ตารางเซนติเมตรต่อปี) อนึ่งค่า D_0 ที่ได้จากการใช้ความกว้างรอยร้าวมากที่สุดที่ยอมรับได้จะมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง ดังนั้นหากก่อสร้างด้วยคอนกรีตที่ได้จากการออกแบบนี้ จะได้อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมยาวนานกว่าที่ต้องการจริง

D_k สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าว (ตารางเซนติเมตรต่อปี) สำหรับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตที่ผสมผงหินปูน คำนวณได้จากสมการ (5.1-ช) หรือจากแผนภูมิการออกแบบ รูปที่ ก-1 ในภาคผนวก ก

สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและคอนกรีตที่ผสมทั้งเถ้าลอยและผงหินปูน คำนวณได้จากสมการ (5.1-ซ) และ (5.1-ฌ) หรือ จากแผนภูมิการออกแบบ รูปที่ ก-1 ถึง ก-8 ในภาคผนวก ก

สำหรับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตที่ผสมผงหินปูน

$$D_{k,c} = (w/b)^3 \times 13.5 \quad \left(\frac{1}{t_r}\right)^{0.40} \qquad (5.1\text{-ช})$$

สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและคอนกรีตที่ผสมทั้งเถ้าลอยและผงหินปูน

$$D_{k,fa} = D_{k,c} \times \alpha_{fa} \qquad (5.1\text{-ซ})$$

โดยที่ สัมประสิทธิ์ผลของการใช้เถ้าลอย (α_{fa}) คำนวณได้จากสมการ (5.1-ฌ)

$$\alpha_{fa} = \left\{\left[3.5 \times \frac{(f/b)^{3.5}}{1-(w/b)}\right] - \left[1.5 \times \frac{(f/b)}{(1-(w/b))^{0.1}}\right] + 1\right\} \times t_r^{\left(\frac{-(f/b)}{(e^{3\times(f/b)})}\right)} \qquad (5.1\text{-ฌ})$$

หรือสามารถหาสัมประสิทธิ์ผลของการใช้เถ้าลอย (α_{fa})ได้จาก การใช้แผนภูมิการออกแบบตามรูปที่ ก-2 ถึง รูปที่ ก-8 ในภาคผนวก ก โดยต้องกำหนดอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมที่ต้องการก่อนแล้วจึงเลือกใช้แผนภูมิการออกแบบให้เหมาะสมกับอายุดังกล่าว อนึ่ง กรณีที่ต้องการอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมอื่นๆ นอกเหนือไปจากแผนภูมิการออกแบบที่ให้ ผู้ออกแบบสามารถคำนวณได้จาก สมการ (5.1-ฌ) หรือคำนวณโดยวิธีประมาณค่าเชิงเส้นตรง (linear interpolation) จากแผนภูมิ

หมายเหตุ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าว (D_k) สามารถหาค่าจากเว็บแอพพลิเคชั่นผ่านเว็บไซต์ https://thaicorrosionmap.mtec.or.th/static/data/dpt1332.html โดยมีรายละเอียดตามภาคผนวก ค

หมายเหตุ

(1) สมการชุดนี้ จัดทำขึ้นสำหรับคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าวและมีรอยร้าว และใช้ข้อมูลคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานระหว่าง 0.30 ถึง 0.60

(2) กรณีคำนวณโดยสมการแล้ว ได้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงกว่า 0.60 ให้ใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 หรือได้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.30 ให้เพิ่มระยะหุ้มเหล็กเสริมให้มากขึ้นแล้วทำการออกแบบใหม่ หรือหากจำเป็นต้องใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.30 ให้ปรึกษาผู้เชี่ยวชาญ

(3) สมการชุดนี้ สามารถใช้ออกแบบคอนกรีตที่มีการใช้ผงหินปูนและเถ้าลอยได้ และจัดทำขึ้นโดยใช้ข้อมูลคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสานไม่เกิน 0.15 และมีอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานไม่เกิน 0.50 หากจำเป็นต้องใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสานเกินกว่า 0.15 หรือมีอัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเกินกว่า 0.50 ให้ปรึกษาผู้เชี่ยวชาญ

(4) กรณีที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ในส่วนผสมคอนกรีตตั้งแต่แรก เช่น การใช้ทรายทะเล ใช้น้ำกร่อย หรือใช้สารเคมีผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ด้วยในการผลิตคอนกรีต ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นทั้งหมดที่ยอมให้ในส่วนผสมคอนกรีตต้องมีไม่มากเกินกว่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 8

(5) กรณีโครงสร้างคอนกรีตอยู่ในสิ่งแวดล้อมน้ำกร่อย สามารถออกแบบโดยวิธีการเดียวกันกับโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล

(6) หากต้องการออกแบบอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมในกรณีที่โครงสร้างคอนกรีตต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์อื่น ๆ ที่ไม่ใช่สิ่งแวดล้อมทะเล เช่น ในโรงงานน้ำแข็ง หรือ บริเวณดินที่มีเกลือสินเธาว์ ให้ปรึกษาผู้เชี่ยวชาญ

(7) โครงสร้างคอนกรีตที่จำเป็นต้องพิจารณาเรื่องปัญหาเหล็กเสริมเป็นสนิมเนื่องจากคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมทะเล ได้แก่ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง ในระยะ 1 กิโลเมตรจากแนวชายฝั่งทะเล หรือแหล่งน้ำเค็ม หรือแหล่งน้ำกร่อย

(8) มาตรฐานนี้ไม่ครอบคลุมกรณีที่เหล็กเสริมมีการเคลือบป้องกันพื้นผิว เช่น การเคลือบด้วยอีพอกซี หรือ การชุบกัลวาไนซ์ (hot-dip galvanization) เป็นต้น

5.2 การเกิดสนิมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น

เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ต้องเผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะแพร่เข้าไปในคอนกรีต และทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นซึ่งจะทำให้ความสามารถของคอนกรีตในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมลดลงจนทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ ตัวอย่างของสภาพแวดล้อมที่มีคาร์บอเนชั่น เช่น โครงสร้างในที่จอดรถ โครงสร้างริมถนนหรือใต้สะพานบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น โครงสร้างใต้สะพานที่เผชิญกับเขม่าควันต่างๆ ตลอดจนในอาคารที่มีผู้คนอยู่มาก เป็นต้น เพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตมีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นและมีอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซม (repair-free service life) ตามที่กำหนด ต้องควบคุมให้ความลึกคาร์บอเนชั่นในช่วงอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมมีค่าน้อยกว่าระยะหุ้มเหล็กเสริม โดยสามารถใช้สมการ (5.2-ก) ต่อไปนี้ในการออกแบบ

$$X_c \le c \qquad \text{(5.2-ก)}$$

โดยที่ c จากการคำนวณทางวิศวกรรมโครงสร้างและ หัวข้อ 4.1 ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุดในมาตรฐานฉบับนี้

X_c สามารถคำนวณได้จากสมการ (5.2-ข)

$$X_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \cdot \sqrt{t_r} \qquad \text{(5.2-ข)}$$

โดยที่ α_1 สามารถกำหนดได้จากตารางที่ 14

α_2 สามารถกำหนดได้จากตารางที่ 15 และรูปที่ 1 กรณีที่ไม่สามารถหาข้อมูลใดๆของสิ่งแวดล้อมจริงได้ตามรูปที่ 1 ให้ใช้เกณฑ์ดังนี้ โครงสร้างอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิด CO_2 (เช่น ถนน โรงงานอุตสาหกรรม) ไม่เกิน 100 ม. จัดเป็นสิ่งแวดล้อมเสี่ยงต่อคาร์บอเนชั่นรุนแรง อยู่ห่างมากกว่า 100 ม. แต่ไม่เกิน 500 ม. จัดเป็นสิ่งแวดล้อมเสี่ยงต่อคาร์บอเนชั่นปานกลาง อยู่ห่างมากกว่า 500 ม. จัดเป็นสิ่งแวดล้อมเสี่ยงต่อคาร์บอเนชั่นน้อย

t_r จากการกำหนดโดยเจ้าของอาคาร ให้พิจารณาจากประเภทของอาคาร ดังตารางที่ 2

k ที่คำนวณได้จากสมการ (5.2-ข) จะถูกใช้ในการกำหนดสัดส่วนผสมคอนกรีต

ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชั่น สามารถกำหนดได้โดยใช้รูปที่ 1 โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของบริเวณสถานที่ที่จะทำการก่อสร้างในช่วงอายุการใช้งาน สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชั่น (k) สามารถคำนวณได้จากสมการ (5.2-ค) ดังต่อไปนี้

$$k = 17.5 \cdot k_r \cdot (w/b)^3 \qquad \text{(5.2-ค)}$$

โดยที่ k_r กรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วนมีค่าเท่ากับ 1 กรณีใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย กำหนดค่าโดยใช้รูปที่ 2 ขึ้นอยู่กับชนิดและสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ของเถ้าลอย (เถ้าลอยชนิด 2ก และ 2ข ตามมาตรฐาน มอก. 2135 หรือ ว.ส.ท. 1014)

ตารางที่ 14 สัมประสิทธิ์การสัมผัสความเปียกชื้น

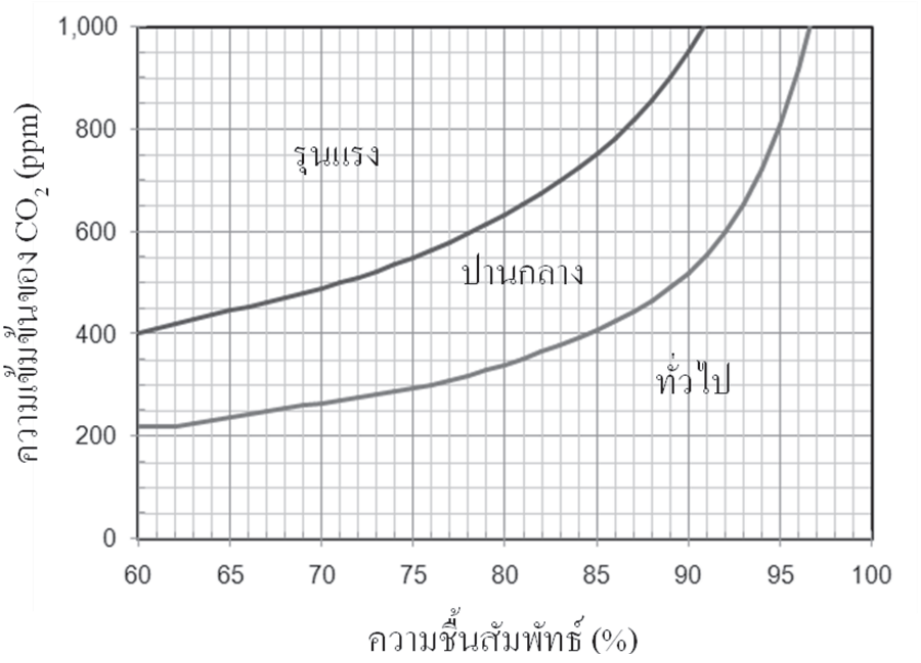
(ข้อ 5.2)

ลักษณะการสัมผัสความเปียกชื้น	สัมประสิทธิ์การสัมผัสความเปียกชื้น (α_1)
1. ผิวคอนกรีตไม่สัมผัสความเปียกชื้นในขณะใช้งาน เช่น ผิวคอนกรีตที่อยู่ในร่มภายในอาคาร	1.0
2. ผิวคอนกรีตสัมผัสความเปียกชื้นในขณะใช้งาน เช่น ผิวคอนกรีตที่อยู่กลางแจ้งสามารถสัมผัสกับฝนได้	0.95

ตารางที่ 15 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชั่น

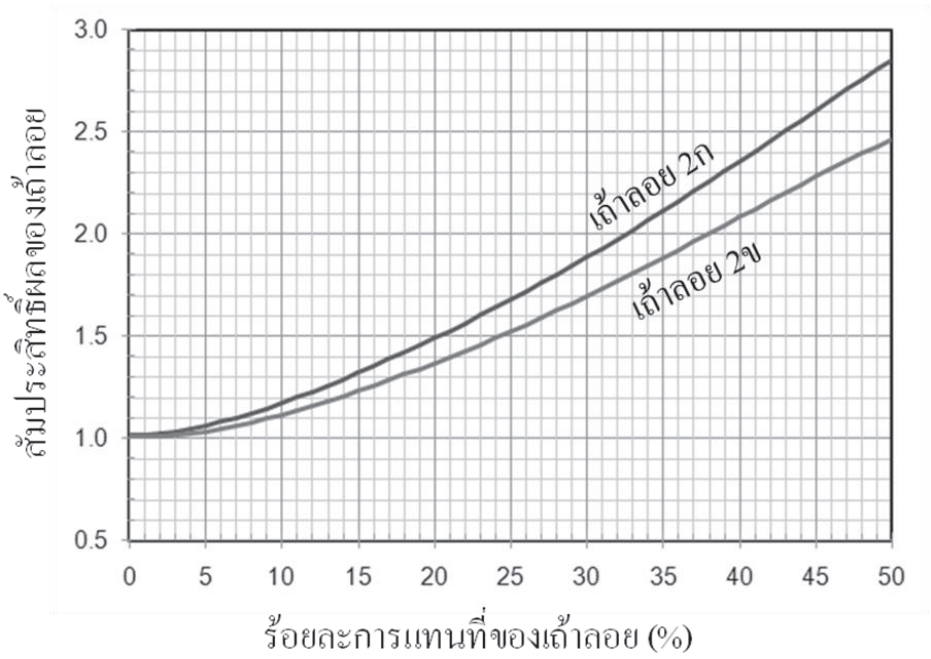
(ข้อ 5.2)

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชั่น (α_2)
1. เสี่ยงต่อคาร์บอเนชั่นน้อย	0.65
2. เสี่ยงต่อคาร์บอเนชั่นปานกลาง	0.85
3. เสี่ยงต่อคาร์บอเนชั่นรุนแรง	1.00



รูปที่ 1 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชั่น

(ข้อ 5.2)



รูปที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน

(ข้อ 5.2)

ข้อแนะนำ

(1) สมการชุดนี้ สามารถใช้ในกรณีของคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าวเท่านั้น โดยคอนกรีตควรมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานไม่เกิน 0.65 และมีการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสานไม่เกินร้อยละ 50

(2) กรณีของคอนกรีตที่มีรอยร้าว ผลของการมีรอยร้าวจะทำให้อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมสั้นลง ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชั่น (k) ในสมการที่ (5.2-ค) ไม่ได้คำนึงถึงผลของรอยร้าว หากต้องการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่มีรอยร้าว หรือใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเกิน 0.65 หรือมีการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสานเกินกว่าร้อยละ 50 ให้ปรึกษาผู้เชี่ยวชาญ

(3) กรณีเหล็กเสริมมีการเคลือบปกป้องพื้นผิว เช่น การเคลือบด้วยอีพอกซี การชุบกัลวาไนซ์ (hot-dipped galvanized) เป็นต้น และมีการคำนวณอายุการใช้งานของชั้นเคลือบให้สามารถปกป้องเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมได้ตามอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมที่กำหนด ไม่จำเป็นต้องออกแบบคอนกรีตตามสมการชุดนี้

ส่วนที่ 6 การออกแบบเมื่อพิจารณาการหดตัว

การหดตัวอิสระ (Free shrinkage) เป็นการหดตัวของมอร์ต้าร์หรือคอนกรีตโดยปราศจากการยึดรั้ง โดยใช้สมมติฐานว่าการหดตัวเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด และไม่มีการพิจารณาผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันภายในคอนกรีตเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่อาจทำให้เกิดการหดตัวที่แตกต่างกัน (differential shrinkage) ระหว่างบริเวณผิวภายนอกและภายในของคอนกรีต จึงเหมาะสำหรับคอนกรีตในโครงสร้างที่มีความหนาไม่มาก ซึ่งสมการคำนวณการหดตัวอิสระได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองในห้องปฏิบัติการและงานวิจัยต่าง ๆ ที่มีการควบคุมสภาพแวดล้อมและคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานทั่วไป ได้แก่

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

2) ปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน มอก.2594 ชนิด GU ทั้งนี้ ต้องมีข้อมูลของปริมาณผงหินปูนในปูนซีเมนต์

3) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย (fly ash) หรือผงหินปูน (limestone powder) หรือทั้งสามอย่าง

4) ปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน มอก.2594 ชนิด GU ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย (fly ash) หรือผงหินปูน (limestone powder) ทั้งนี้ ต้องมีข้อมูลของปริมาณผงหินปูนในปูนซีเมนต์

ดังนั้น กรณีที่สภาพแวดล้อม หรือชนิดวัสดุประสานที่แตกต่างจากเงื่อนไขข้างต้น อาจทำให้ค่าการหดตัวที่คำนวณได้จากสมการไม่สอดคล้องกับการหดตัวที่เกิดขึ้นจริง

6.1 การหดตัวรวม

การหดตัวที่เกิดขึ้นในโครงสร้างคอนกรีตที่สัมผัสกับอากาศ หรือโครงสร้างที่ความชื้นสามารถเข้าหรือออกจากคอนกรีตได้ เป็นการหดตัวที่เกิดจากการหดตัวออโตจีนัสร่วมกับการหดตัวแห้ง รวมเรียกว่า การหดตัวรวม (total shrinkage) ดังสมการ (6.1-ก) การออกแบบโครงสร้างเพื่อควบคุมการแตกร้าวของคอนกรีต จึงควรนำค่าการหดตัวรวมของคอนกรีตไปใช้ในการออกแบบ การคำนวณการหดตัวรวมของคอนกรีตจำเป็นต้องคำนึงถึงผลของวิธีและระยะเวลาการบ่มคอนกรีต เนื่องจากการบ่มจะส่งผลต่อพฤติกรรมการหดตัวทั้งแบบออโตจีนัสและการหดตัวแห้ง โดยการหดตัวออโตจีนัสที่เกิดขึ้นในสภาวะการบ่มที่แตกต่างกันจะมีค่าการหดตัวที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ในกรณีของการบ่มด้วยน้ำหรือบ่มด้วยกระสอบที่เปียกตลอดเวลา น้ำที่ใช้บ่มสามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้บางส่วน น้ำเหล่านี้จะเข้าไปแทนที่น้ำในช่องว่างแคพิลลารีที่สูญเสียไปจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้การหดตัวออโตจีนัสมีค่าลดลงหรืออาจทำให้ไม่เกิดการหดตัวออโตจีนัสขึ้นในช่วงที่ทำการบ่ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างที่มีความหนาไม่มาก ส่วนในกรณีที่ไม่บ่มหรือบ่มโดยการหุ้มด้วยพลาสติก จะไม่มีน้ำจากภายนอกเข้าไปในคอนกรีต ทำให้การหดตัวออโตจีนัสสามารถเกิดได้มากขึ้น ส่วนในกรณีของการหดตัวแห้ง ในขณะที่บ่มถือว่าน้ำไม่สามารถออกจากคอนกรีตได้ จึงไม่ทำให้เกิดการหดตัวแห้ง การคำนวณการหดตัวแห้งจึงเริ่มพิจารณาเมื่อผิวคอนกรีตเริ่มสัมผัสกับอากาศ หรือเมื่อเลิกบ่ม ดังนั้นการคำนวณการหดตัวรวมจึงต้องพิจารณาปัจจัยเรื่องวิธีและระยะเวลาการบ่มร่วมด้วย

ดังนั้นเพื่อให้การคำนวณการหดตัวครอบคลุมผลของการบ่มดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น และสอดคล้องกับการหดตัวรวมที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง จึงกำหนดให้คอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำหรือกระสอบที่เปียกตลอดเวลาจะไม่เกิดการหดตัวในช่วงที่บ่ม การหดตัวออโตจีนัสที่มีระยะเวลาการบ่ม t_0 สามารถคำนวณได้จากสมการ (6.1-ข) และมีลักษณะการหดตัวรวมแสดงดังรูปที่ 3 ส่วนในกรณีที่บ่มด้วยการห่อหุ้มพลาสติก ลักษณะการหดตัวรวมแสดงดังรูปที่ 4

$$\varepsilon_{TS}(t,t_0) = \varepsilon_{as}(t,t_0) + \varepsilon_{ds}(t,t_0) \qquad (6.1\text{-ก})$$

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_{as}(t,t_0) &= \varepsilon_{as}(t) - \varepsilon_{as}(t_0) \quad \text{กรณีบ่มกระสอบหรือบ่มน้ำ (บ่มชื้น)} \\ &= \varepsilon_{as}(t) \qquad\qquad\quad \text{กรณีบ่มด้วยการห่อพลาสติก} \end{aligned}\right\} \qquad (6.1\text{-ข})$$

$$\varepsilon_{ds}(t,t_0) = \varepsilon_{ds}(t-t_0) \qquad (6.1\text{-ค})$$

โดยที่ $\varepsilon_{TS}(t,t_0)$ คือ ค่าการหดตัวรวมของคอนกรีตระหว่างอายุ t_0 ถึง t ($\times 10^{-6}$)

$\varepsilon_{as}(t,t_0)$ คือ ค่าการหดตัวออโตจีนัสของคอนกรีตระหว่างอายุ t_0 ถึง t ($\times 10^{-6}$)

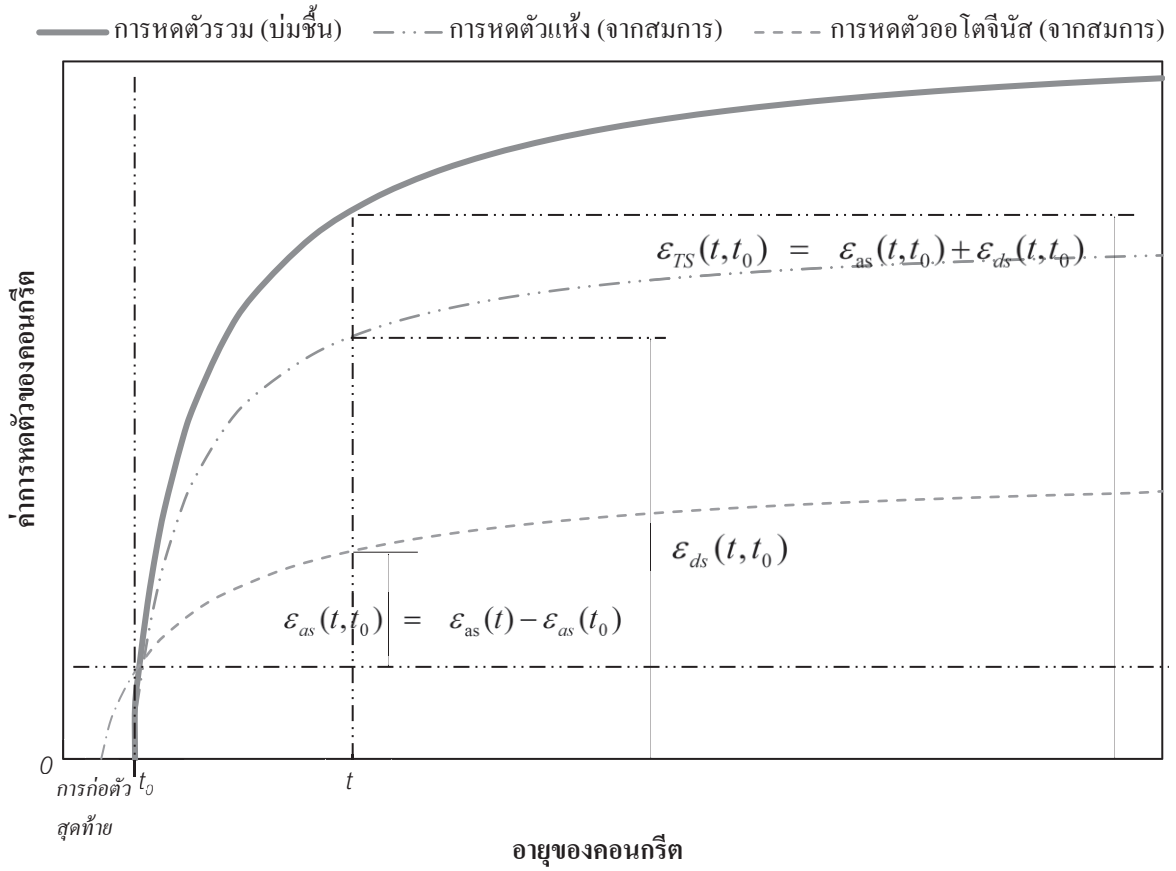
$\varepsilon_{ds}(t,t_0)$ คือ ค่าการหดตัวแห้งของคอนกรีตระหว่างอายุ t_0 ถึง t ($\times 10^{-6}$)

$\varepsilon_{as}(t)$ คือ ค่าการหดตัวออโตจีนัสที่อายุที่พิจารณาของคอนกรีต ($\times 10^{-6}$)

$\varepsilon_{as}(t_0)$ คือ ค่าการหดตัวออโตจีนัสที่อายุของคอนกรีตที่เริ่มสัมผัสกับอากาศ ($\times 10^{-6}$)

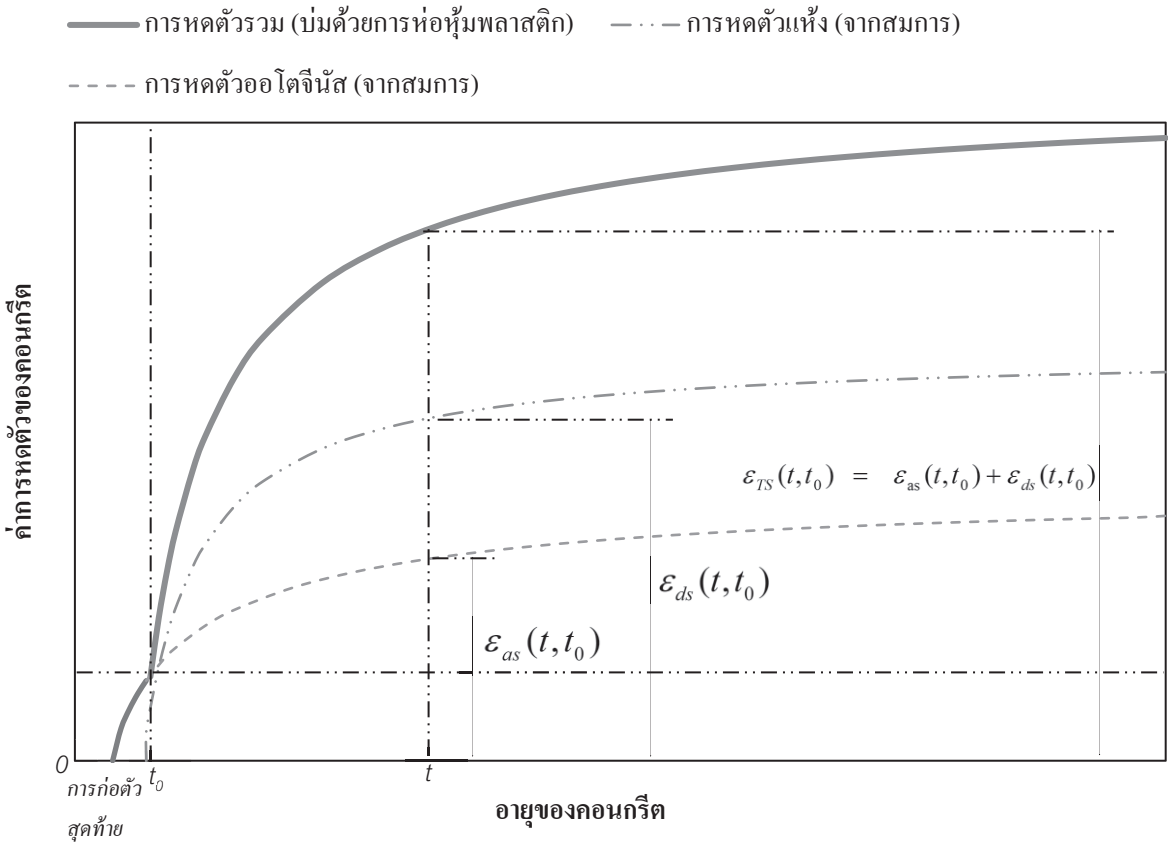
t คือ อายุของคอนกรีตที่พิจารณาหาค่าการหดตัว (วัน)

t_0 คือ อายุของคอนกรีตที่เริ่มสัมผัสกับอากาศหลังจากการบ่มชื้น (วัน)



รูปที่ 3 ลักษณะการหดตัวรวมของคอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำหรือกระสอบที่เปียกตลอดเวลา และมีระยะเวลาการบ่ม t_0

(ข้อ 6.1)



รูปที่ 4 ลักษณะการหดตัวรวมของคอนกรีตที่บ่มด้วยการห่อหุ้มพลาสติก และมีระยะเวลาการบ่ม t_0

(ข้อ 6.1)

หมายเหตุ

การหดตัวออโตจีนัสจะสัมพันธ์กับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และถือว่าการหดตัวออโตจีนัสเริ่มเกิดหลังจากการก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีต ดังนั้นการคำนวณค่าการหดตัวออโตจีนัสในช่วงเวลาต่าง ๆ จึงใช้ค่าการหดตัวสัมพัทธ์ (relative strain) ดังสมการ (6.1-ข) ในขณะที่การคำนวณค่าการหดตัวแห้งมีสมมติฐานว่า การหดตัวแห้งเกิดขึ้นหลังจากที่เลิกบ่มจึงใช้ช่วงเวลาหลังจากที่คอนกรีตสัมผัสกับอากาศ เป็นค่าอายุของคอนกรีตที่ใช้ในการคำนวณการหดตัวแห้ง ($t-t_0$) ดังสมการ (6.1-ค)

6.2 การหดตัวออโตจีนัส

การหดตัวออโตจีนัส ส่วนหนึ่งเป็นการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดหลังจากการก่อตัวของคอนกรีต รวมกับอีกส่วนหนึ่งที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นในช่องว่างแคพิลลารี (capillary pore) เนื่องจากความชื้นบางส่วนถูกใช้ไปในปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำ ทำให้เกิดแรงแคพิลลารี (capillary suction) ขึ้นในช่องว่างแคพิลลารี มีผลให้คอนกรีตหดตัวจากแรงแคพิลลารี ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “self-desiccation” การหดตัวออโตจีนัสแตกต่างจากการ

หดตัวแห้งตรงที่ไม่มีการสูญเสียความชื้นในคอนกรีตไปสู่สิ่งแวดล้อม แต่เป็นการสูญเสียความชื้นภายในคอนกรีตเอง ปัจจัยที่ส่งผลต่อการหดตัวออโตจีนัสจะสัมพันธ์กับปัจจัยที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น กล่าวคือ หากอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมีค่าสูง การหดตัวออโตจีนัสมักจะเกิดขึ้นได้มาก ดังนั้นองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ปริมาณและความละเอียดของปูนซีเมนต์ และอุณหภูมิของคอนกรีต จึงมีผลต่อการหดตัวออโตจีนัส นอกจากนี้ขนาดและลักษณะของช่องว่างแคพิลลารี ที่ยิ่งมีขนาดเล็กและมีความไม่ต่อเนื่อง จะทำให้การหดตัวออโตจีนัสสูงขึ้น ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำจึงมีการหดตัวมากกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง การหดตัวเกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ในขณะที่มวลรวมจะยึดรั้งการหดตัว ดังนั้นปริมาณ ขนาด และความแข็งแรงของมวลรวมที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้การหดตัวลดลง การใช้แร่ผสมเพิ่มเช่น เถ้าลอย และผงหินปูน จะมีผลต่อการหดตัวออโตจีนัสของคอนกรีต โดยการหดตัวจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี สมบัติทางกายภาพ และปริมาณของแร่ผสมเพิ่มที่นำมาใช้

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวออโตจีนัสที่นำมาใช้ในการคำนวณได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนมวลรวมโดยปริมาตร ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยหรือผงหินปูน ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ในเถ้าลอย อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม รวมถึงขนาดและสมบัติของมวลรวมหยาบ สมการคำนวณค่าการหดตัวออโตจีนัสของคอนกรีตแสดงดังสมการ (6.2-ก) ถึง สมการ (6.2-ฒ)

$$\varepsilon_{as}(t,t_0) = \varepsilon_{as}(t) - \varepsilon_{as}(t_0) \qquad \text{(6.2-ก)}$$

$$\varepsilon_{as}(t_0) = \varepsilon_{asm} \cdot \beta(t_0) \qquad \text{(6.2-ข)}$$

$$\varepsilon_{as}(t) = \varepsilon_{asm} \cdot \beta(t) \qquad \text{(6.2-ค)}$$

$$\varepsilon_{asm} = 258\left(-ln\,(w/b)\right) \times \gamma_T \times \gamma_{FA} \times \gamma_{LP} \times \gamma_n \times \gamma_{\varphi R} \times \gamma_{SR} \qquad \text{(6.2-ง)}$$

$$\gamma_T = 0.61T^{0.15} \qquad \text{(6.2-จ)}$$

$$\gamma_{FA} = \chi \times exp\,\left(\left(1/\left(-1.13+0.49\left(w/b\right)^{3.10}\right)\right) r_{FA}\right) \qquad \text{(6.2-ฉ)}$$

$$\chi = 1 \qquad \text{(สำหรับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย)}$$

$$\chi = 1 + 0.46exp\left(-3.55\ \left(\%SO_{3f}\right)\right) \qquad \text{(สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย)} \qquad \text{(6.2-ช)}$$

$$\gamma_{LP} = 1/\ \left(1+1.08\left(r_{LP}\right)^{1.23}\right) \qquad \text{(6.2-ซ)}$$

$$\gamma_n = 165\ \left(0.00053\right)^n \qquad \text{(6.2-ฌ)}$$

$$\gamma_{\varphi R} = 1.286/\ \left(1+exp\ (3.972-0.0054\varepsilon_R)\right)^{(1/13)} \qquad \text{(6.2-ญ)}$$

$$\varepsilon_R = -52+699\varphi_R - 86\varphi_R{}^2 \qquad \text{(6.2-ฎ)}$$

$$\gamma_{SR} = 1.338\exp(-340/058S_R) \qquad \text{(6.2-ฏ)}$$

$$\beta(t) = 1-exp\ (-\eta \cdot t^{\lambda}) \qquad \text{(6.2-ฐ)}$$

$$\eta = 0.04\left(w/b\right)^{-1.62} \qquad (6.2\text{-ฑ})$$

$$\lambda = 0.22\left(8.96\right)^{(w/b)} \qquad (6.2\text{-ฒ})$$

โดยที่

$\varepsilon_{as}(t,t_0)$ คือ ค่าการหดตัวออโตจีนัสของคอนกรีตระหว่างอายุ t_0 ถึง t ($\times 10^{-6}$)

$\varepsilon_{as}(t)$ คือ ค่าการหดตัวออโตจีนัสที่อายุ t ที่พิจารณาของคอนกรีต t ($\times 10^{-6}$)

$\varepsilon_{as}(t_0)$ คือ ค่าการหดตัวออโตจีนัสที่อายุ t_0 ของคอนกรีตที่เริ่มสัมผัสกับอากาศหลังจากการบ่มชื้น ($\times 10^{-6}$)

ε_{asm} คือ ค่าการหดตัวออโตจีนัสสูงสุดของคอนกรีต ($\times 10^{-6}$)

ε_R คือ ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลของการดูดซึมของหิน

$\beta(t)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่อายุที่พิจารณาของคอนกรีต

t คือ อายุที่พิจารณาหาค่าการหดตัว (วัน)

t_0 คือ อายุของคอนกรีตที่เริ่มสัมผัสกับอากาศหลังจากการบ่มชื้น (วัน)

γ_T คือ ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลจากอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

γ_{FA} คือ ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลของเถ้าลอย

γ_{LP} คือ ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลของผงหินปูน

γ_n คือ ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลของปริมาณมวลรวม

$\gamma_{\varphi R}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวของหินต่อการหดตัวของคอนกรีต

γ_{SR} คือ ค่าสัมประสิทธิ์พื้นที่ผิวจำเพาะของหินต่อการหดตัวของคอนกรีต

w/b คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยน้ำหนัก

T คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (°C)

r_{FA} คือ อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยโดยน้ำหนัก

$\%SO_{3f}$ คือ ปริมาณร้อยละของ SO_3 ในเถ้าลอย (%)

r_{LP} คือ อัตราส่วนการแทนที่ด้วยผงหินปูนโดยน้ำหนัก

n คือ อัตราส่วนของมวลรวมโดยปริมาตรในส่วนผสม

φ_R คือ ร้อยละการดูดซึมน้ำของหิน (%)

S_R คือ ผลรวมพื้นที่ผิวจำเพาะภายนอกของหินที่นำมาผสมคอนกรีต (ตร.ซม./กก. ของหิน) (ดูตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ข)

หมายเหตุ

เนื่องจากสมการคำนวณค่าการหดตัวออโตจีนัสของคอนกรีตนี้ ได้จากการนำผลการทดสอบมาใช้ในการสร้างสมการ โดยอาศัยหลักการทางสถิติ ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดในการใช้งานตามช่วงของตัวแปรต่าง ๆ ที่นำมาใช้ โดย

สมการคำนวณค่าการหดตัวออโตจีนัสของคอนกรีตที่นำเสนอในมาตรฐานนี้เหมาะสำหรับคอนกรีตที่มีอายุตั้งแต่ 1 วัน และใช้กับคอนกรีตที่มีส่วนผสมและสภาพแวดล้อมในขอบเขตของปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	(ประเภท 1)
- อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b)	(0.27 – 0.80)
- อัตราส่วนมวลรวมโดยปริมาตรในส่วนผสม (n)	(0.643 – 0.746)
- การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)	(ไม่เกิน 60%)
- ปริมาณ SO_3 ในเถ้าลอย	(ไม่เกิน 5.0%)
- การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)	(ไม่เกิน 20%)
- ความละเอียดของผงหินปูน	(2 – 13 micron)
- ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ	(3/8" - 1")
- อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม	(20^0C - 35^0C)

หมายเหตุ : ในกรณีใช้ปูนซีเมนต์ตาม มาตรฐาน มอก.2594 ชนิด GU ให้พิจารณาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตาม มอก.15 และในกรณีที่มีปริมาณผงหินปูนผสมอยู่ในปูนซีเมนต์ตาม มาตรฐาน มอก.2594 ชนิด GU มากกว่าร้อยละ 10 ให้พิจารณาผลของปริมาณผงหินปูนที่ผสมในปูนซีเมนต์ตาม มาตรฐาน มอก.2594 ชนิด GU ร่วมด้วย

6.3 การหดตัวแห้ง

การหดตัวแห้งเกิดจากการที่คอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตสูญเสียน้ำอิสระในช่องว่างแคพิลลารีไปสู่สิ่งแวดล้อมด้วยการระเหย ทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในช่องว่างแคพิลลารีและส่งผลให้เกิดการหดตัว การหดตัวแห้งแตกต่างจากการหดตัวพลาสติกตรงที่ช่วงเวลาเกิดการหดตัวพลาสติก จะเกิดในช่วงที่คอนกรีตอยู่ในช่วงพลาสติกก่อนที่คอนกรีตจะแข็งตัว ในขณะที่การหดตัวแห้งจะเกิดหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว ปัจจัยที่ส่งผลต่อการหดตัวแห้งจะสัมพันธ์กับปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการระเหยของน้ำออกสู่สิ่งแวดล้อมและปริมาณน้ำอิสระในคอนกรีต ดังนั้นหากคอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง และความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ จะทำให้น้ำอิสระในคอนกรีตระเหยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้มาก ส่งผลให้เกิดการหดตัวแห้งได้มาก วิธีและระยะเวลาการบ่มจะมีผลต่อการระเหยของน้ำรวมถึงส่งผลต่อสมบัติด้านกำลังของคอนกรีต จึงมีผลต่อการหดตัวแห้งของคอนกรีตเช่นกัน คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงจะมีน้ำอิสระมาก จึงทำให้เกิดการหดตัวแห้งได้มากกว่ากว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ การหดตัวเกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ในขณะที่มวลรวมจะยึดรั้งการหดตัว ดังนั้นปริมาณ ขนาด และความแข็งแรงของมวลรวม จึงส่งผลต่อการหดตัวของคอนกรีต การใช้แร่ผสมเพิ่มเช่น เถ้าลอย และผงหินปูน จะส่งผลต่อการหดตัวแห้ง โดยการหดตัวจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี สมบัติทางกายภาพ และปริมาณของแร่ผสมเพิ่มที่นำมาใช้ นอกจากนี้ขนาดของโครงสร้างยังส่งผลต่อ

ปริมาณการระเหยของน้ำออกจากโครงสร้าง โดยโครงสร้างที่มีอัตราส่วนของปริมาตรต่อพื้นที่ผิวต่ำ จะเกิดการหดตัวได้มากกว่าโครงสร้างที่มีอัตราส่วนของปริมาตรต่อพื้นที่ผิวสูง

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวแห้งที่นำมาใช้ในการคำนวณได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนมวลรวมโดยปริมาตรในส่วนผสม ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยหรือผงหินปูน ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ในเถ้าลอย ระยะเวลาและวิธีการบ่ม ขนาดและสมบัติของมวลรวมหยาบ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม และความชื้นสัมพัทธ์ สมการคำนวณค่าการหดตัวแห้งของคอนกรีตดังสมการ (6.3-ก) ถึง สมการ (6.3-ต)

$$\varepsilon_{ds}(t,t_0) = \varepsilon_{dsm} \cdot \beta(t,t_0) \qquad \text{(6.3-ก)}$$

$$\varepsilon_{dsm} = \left[\frac{24.57 + 717(w/b)^{6.93}}{0.054 + (w/b)^{6.93}} \right] \times K_T \times K_{RH} \times K_{FA} \times K_{LP} \times K_{CU} \times K_n \times K_{\varphi R} \times K_{SR} \qquad \text{(6.3-ข)}$$

$$K_T = 0.88(1.049^T)(T^{-0.36}) \qquad \text{(6.3-ค)}$$

$$K_{RH} = 1.143(1-(RH/100)^3) \qquad \text{(6.3-ง)}$$

$$K_{FA} = \delta \cdot ((1+0.07r_{FA})^{(1/0.2)}) \qquad \text{(6.3-จ)}$$

$$\delta = 1 \qquad \text{(สำหรับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย)}$$

$$\delta = 1 + 0.17\exp(-3.07(\%SO_{3f})) \qquad \text{(สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย)} \qquad \text{(6.3-ฉ)}$$

$$K_{LP} = 1/(1+1.08(r_{LP})^{1.23}) \qquad \text{(6.3-ช)}$$

$$K_{CU} = (1/(0.917 + \alpha \cdot (t_0)^{\psi}) \quad (\alpha \text{ และ } \Psi \text{ ดูตารางที่ 16}) \qquad \text{(6.3-ซ)}$$

$$K_n = 6.644(0.061)^n \qquad \text{(6.3-ฌ)}$$

$$K_{\varphi R} = 1.422/(1+\exp(10.676 - 0.018\varepsilon_R))^{(1/21.287)} \qquad \text{(6.3-ญ)}$$

$$\varepsilon_R = -52 + 699\varphi_R - 86\varphi_R^2 \qquad \text{(6.3-ฎ)}$$

$$K_{SR} = 1.412\exp\left(-422/\left(0.58S_R\right)\right) \qquad \text{(6.3.ฏ)}$$

$$\beta(t,t_0) = \frac{(t-t_0)\cdot B}{(t-t_0) + A \cdot G \cdot N \cdot F} \qquad \text{(6.3-ฐ)}$$

$$B = 9.21^{(1/f_c')} \qquad \text{(6.3-ฑ)}$$

$$A = 10\exp(16/f_c') \qquad \text{(6.3-ฒ)}$$

$$G = 0.24(V/S)^{0.51} \qquad \text{(6.3-ณ)}$$

$$N = 2.58\exp(-1.44n) \qquad \text{(6.3-ด)}$$

$$F = 1 \qquad \text{(สำหรับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย)}$$

$$F = (0.93r_{FA}^{0.94})^{r_{FA}} \qquad \text{(สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย)} \qquad \text{(6.3-ต)}$$

โดยที่

$\varepsilon_{ds}(t,t_0)$ คือ ค่าการหดตัวแห้งของคอนกรีตระหว่างอายุ t_0 ถึง t ($\times 10^{-6}$)

$\beta(t,t_0)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่อายุวันที่พิจารณาระหว่างอายุ t_0 ถึง t

ε_{dsm} คือ ค่าการหดตัวแห้งสูงสุดของคอนกรีต ($\times 10^{-6}$)

ε_R คือ ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลของการดูดซึมของหิน

K_T คือ ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลจากอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

K_{FA} คือ ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลของเถ้าลอย

K_{LP} คือ ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลของผงหินปูน

K_{CU} คือ สัมประสิทธิ์สำหรับวิธีการบ่มและระยะเวลาการบ่ม (α และ Ψ ดูตารางที่ 16)

K_n คือ ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับผลของปริมาณมวลรวม

$K_{\varphi R}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การหดตัวของหินต่อการหดตัวของคอนกรีต

K_{SR} คือ ค่าสัมประสิทธิ์พื้นที่ผิวจำเพาะของหินต่อการหดตัวของคอนกรีต

w/b คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยน้ำหนัก

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม (%)

n คือ อัตราส่วนของมวลรวมโดยปริมาตรในส่วนผสม

T คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (°C)

r_{FA} คือ อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยโดยน้ำหนัก

$\%SO_{3f}$ คือ ปริมาณร้อยละของ SO_3 ในเถ้าลอย (%)

r_{LP} คือ อัตราส่วนการแทนที่ด้วยผงหินปูนโดยน้ำหนัก

φ_R คือ ร้อยละการดูดซึมน้ำของหิน (%)

S_R คือ ผลรวมพื้นที่ผิวจำเพาะภายนอกของหินที่นำมาผสมคอนกรีต (ตร.ซม./กก. ของหิน) (ดูตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก)

$f_c^{'}$ คือ กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน (เมกาปาสกาล)

V/S คือ อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวซึ่งสัมผัสอากาศ (มม.)

หมายเหตุ

เนื่องจากสมการคำนวณค่าการหดตัวแห้งของคอนกรีต ได้จากการนำผลการทดสอบมาใช้ในการสร้างสมการโดยอาศัยหลักการทางสถิติ ดังนั้นสมการที่ได้จึงมีข้อจำกัดในการใช้งานตามช่วงของตัวแปรต่าง ๆ ที่นำมาใช้ โดยสมการคำนวณค่าการหดตัวแห้งของคอนกรีตที่นำเสนอในมาตรฐานนี้เหมาะสมสำหรับใช้กับคอนกรีตที่มีส่วนผสมและสภาพแวดล้อมในขอบเขตของปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ประเภท 1)
- อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) (โดยน้ำหนัก) (0.27 – 0.80)

- อัตราส่วนมวลรวมโดยปริมาตรในส่วนผสม (n) (0.643 – 0.746)
- การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) (ไม่เกิน 60%)
- ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ในเถ้าลอย (ไม่เกิน 5.0%)
- การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) (ไม่เกิน 20%)
- ความละเอียดของผงหินปูน (2 – 13 micron)
- ระยะเวลาการบ่มของคอนกรีต (ไม่เกิน 14 วัน)
- ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ (3/8" - 1")
- อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (28^0C - 35^0C)
- ความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม (50% - 75%)

หมายเหตุ ในกรณีใช้ปูนซีเมนต์ตาม มาตรฐาน มอก.2594 ชนิด GU ให้พิจารณาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ตาม มอก.15 และในกรณีที่มีปริมาณผงหินปูนผสมอยู่ในปูนซีเมนต์ตาม มาตรฐาน มอก.2594 ชนิด GU มากกว่าร้อยละ 10 ให้พิจารณาผลของปริมาณผงหินปูนที่ผสมในปูนซีเมนต์ตาม มาตรฐาน มอก.2594 ชนิด GU ร่วมด้วย

ตารางที่ 16 ค่าคงที่ประกอบการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์วิธีและระยะเวลาการบ่ม

(ข้อ 6.3)

สัมประสิทธ์	บ่มน้ำ	บ่มกระสอบ	บ่มแบบหุ้มด้วยพลาสติก
α	0.014	0.0012	0.0003
Ψ	0.912	1.738	2.100

ส่วนที่ 7 การออกแบบเมื่อพิจารณาการเสื่อมสภาพเนื่องจากซัลเฟต

เมื่อคอนกรีตเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่มีซัลเฟต ซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับบางองค์ประกอบในคอนกรีต ซึ่งจะทำให้คอนกรีตขยายตัวแตกร้าวหรือเสื่อมสภาพ ตัวอย่างของโครงสร้างที่สัมผัสกับซัลเฟต เช่น โครงสร้างใต้ดิน โครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำทะเล หรือโครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำเสีย โดยทั่วไปในสภาพแวดล้อมเหล่านี้จะพบสารละลายซัลเฟตได้ 2 ชนิดคือ โซเดียมซัลเฟต และ/หรือ แมกนีเซียมซัลเฟต

7.1 การเสื่อมสภาพเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมที่มีสารละลายโซเดียมซัลเฟต สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายระดับโดยใช้เกณฑ์ตามตารางที่ 17 และเพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานต่อระดับความรุนแรงนั้นๆ ส่วนผสมคอนกรีตจำเป็นต้องถูกออกแบบตามเงื่อนไขตารางที่ 18

ตารางที่ 17 ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมที่มีโซเดียมซัลเฟต

(ข้อ 7.1)

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	ความเข้มข้นซัลเฟต (SO_4^{2-})	
	ในน้ำ (ppm)	ปริมาณซัลเฟตที่ละลายน้ำได้ในดิน (ร้อยละ โดยน้ำหนักของดิน)
สภาวะทั่วไป	น้อยกว่า 150	น้อยกว่า 0.1
เสี่ยงต่อซัลเฟตปานกลาง	150 – 1,500	0.1 – 0.2
เสี่ยงต่อซัลเฟตรุนแรง	1,500 – 10,000	0.2 – 2.0
เสี่ยงต่อซัลเฟตรุนแรงมาก	มากกว่า 10,000	มากกว่า 2.0

ตารางที่ 18 ข้อกำหนดของคอนกรีตเพื่อให้มีความคงทนต่อโซเดียมซัลเฟต

(ข้อ 7.1)

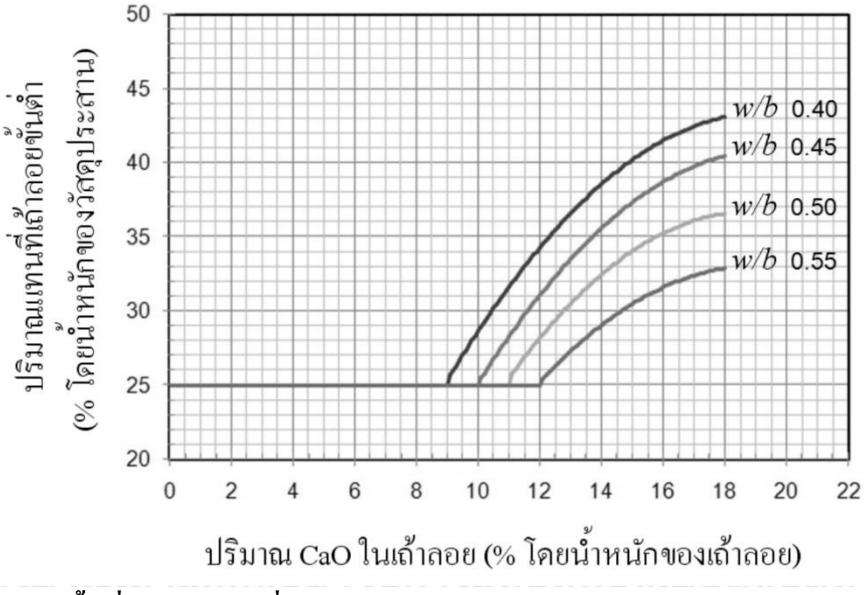
ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	ชนิดวัสดุประสานที่ควรใช้	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด
สภาวะทั่วไป	ไม่จำกัด	-
เสี่ยงต่อซัลเฟตปานกลาง	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 2 หรือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 หรือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 กับสารปอซโซลาน หรือ ปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน มอก. 2594 ชนิด GU กับสารปอซโซลาน	0.50
เสี่ยงต่อซัลเฟตรุนแรง	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 กับสารปอซโซลาน หรือ ปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน มอก. 2594 ชนิด GU กับสารปอซโซลาน	0.45
เสี่ยงต่อซัลเฟตรุนแรงมาก	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 กับสารปอซโซลาน หรือ ปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน มอก. 2594 ชนิด GU กับสารปอซโซลาน หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 กับสารปอซโซลาน	0.40

หมายเหตุ:

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในตารางที่ 18 หมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตาม มอก. 15

ในกรณีที่ใช้เถ้าลอยเพื่อแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ตามตารางที่ 18 ปริมาณเถ้าลอยขั้นต่ำที่ควรใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 หรือปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน มอก. 2594 ชนิด GU เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการ

ต้านทานโซเดียมซัลเฟตเทียบเท่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 (ปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟต) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยที่ใช้ โดยสามารถกำหนดได้จากรูปที่ 5



รูปที่ 5 ปริมาณเถ้าลอยขั้นต่ำในการแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภท 1 หรือปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน มอก. 2594 ชนิด GU เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการต้านทานโซเดียมซัลเฟตเทียบเท่าปูนซีเมนต์ประเภท 5

(ข้อ 7.1)

7.2 การเสื่อมสภาพเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมที่มีแมกนีเซียมซัลเฟตสามารถแบ่งได้โดยใช้เกณฑ์ตามตารางที่ 19 และเพื่อให้คอนกรีตสามารถต้านทานต่อแมกนีเซียมซัลเฟตที่ระดับความรุนแรงต่างๆ ได้ ส่วนผสมคอนกรีตจำเป็นต้องถูกออกแบบตามเงื่อนไขในดังตารางที่ 20

ตารางที่ 19 ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมที่มีแมกนีเซียมซัลเฟต

(ข้อ 7.2)

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	ความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตในน้ำ (ppm)
สภาวะทั่วไป	น้อยกว่า 300
เสี่ยงต่อซัลเฟตปานกลาง	300 – 1000
เสี่ยงต่อซัลเฟตรุนแรง	1000 – 3000
เสี่ยงต่อซัลเฟตรุนแรงมาก	3000 – ค่าอิ่มตัว

ตารางที่ 20 ข้อกำหนดของคอนกรีตเพื่อให้มีความคงทนต่อแมกนีเซียมซัลเฟต

(ข้อ 7.2)

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	ชนิดวัสดุประสานที่ควรใช้	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด
สภาวะทั่วไป	ไม่จำกัด	-
เสี่ยงต่อซัลเฟตปานกลาง	ปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน มอก. 2594 ชนิด GU หรือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 2 หรือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 หรือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 กับผงหินปูน หรือ ปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน มอก. 2594 ชนิด GU กับผงหินปูน	0.50
เสี่ยงต่อซัลเฟตรุนแรง	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 หรือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 กับผงหินปูน หรือ ปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน มอก. 2594 ชนิด GU กับผงหินปูน หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 กับผงหินปูน	0.45
เสี่ยงต่อซัลเฟตรุนแรงมาก	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 หรือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 กับผงหินปูน	0.40

หมายเหตุ:

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในตารางที่ 20 หมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตาม มอก. 15

2) ปริมาณผงหินปูนที่มีอยู่ในส่วนผสมของวัสดุประสานโดยรวมไม่เกินร้อยละ 15 โดยหากใช้ปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน มอก. 2594 ชนิด GU ให้นับรวมปริมาณผงหินปูนที่ผสมอยู่แล้วในปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน มอก. 2594 ชนิด GU ด้วย

ข้อแนะนำ

(1) ไม่ควรใช้สารปอซโซลานแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ในคอนกรีตที่ต้องเผชิญกับแมกนีเซียมซัลเฟต เนื่องจากจะทำให้คอนกรีตเสื่อมสภาพในแมกนีเซียมซัลเฟตในลักษณะของการสูญเสียน้ำหนักเร็วกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

(2) เมื่อจำเป็นต้องออกแบบคอนกรีตให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยกว่า 0.35 ผู้ออกแบบคอนกรีตจำเป็นต้องคำนึงถึงการหดตัวออโตจีนัส (autogenous shrinkage) ด้วย

ส่วนที่ 8 การออกแบบเมื่อพิจารณาเรื่องอัคคีภัย

สำหรับอาคารที่ต้องการก่อสร้างให้สามารถทนไฟได้ตามกฎกระทรวงฉบับที่ 48 (พ.ศ. 2540) แห่งพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุดที่คำนวณได้จากสมการใดๆ ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนดในตารางที่ 21

ตารางที่ 21 ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (c_0) สำหรับคอนกรีตที่ต้องการก่อสร้างให้สามารถทนไฟ

(ข้อ 8)

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด (มม.)
1. คอนกรีตเสริมเหล็ก	
(ก) เสาสี่เหลี่ยมที่มีด้านแคบขนาด 300 มม. ขึ้นไป	40
(ข) เสากลมหรือเสาตั้งแต่ห้าเหลี่ยมขึ้นไปที่มีรูปทรงใกล้เคียงเสากลม ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 300 มม. ขึ้นไป	40
(ค) คานหรือโครงข้อหมุนคอนกรีตขนาดกว้างตั้งแต่ 300 มม. ขึ้นไป	40
(ง) พื้นหนาไม่น้อยกว่า 115 มม.	20
2. คอนกรีตอัดแรง	
(ก) คานชนิดดึงลวดก่อน	75
(ข) คานชนิดดึงลวดภายหลัง	
- กว้าง 200 มม. โดยปลายไม่เหนี่ยวรั้ง (unrestrained)	115
- กว้างตั้งแต่ 300 มม. ขึ้นไป โดยปลายไม่เหนี่ยวรั้ง (unrestrained)	65
- กว้าง 200 มม. โดยปลายเหนี่ยวรั้ง (restrained)	50
- กว้างตั้งแต่ 300 มม. ขึ้นไป โดยปลายเหนี่ยวรั้ง (restrained)	45
(ค) พื้นชนิดดึงลวดก่อนที่มีความหนาตั้งแต่ 115 มม. ขึ้นไป	40
(ง) พื้นชนิดดึงลวดภายหลังที่มีความหนาตั้งแต่ 115 มม. ขึ้นไป	
- ขอบไม่เหนี่ยวรั้ง (unrestrained)	40
- ขอบเหนี่ยวรั้ง (restrained)	20

เอกสารอ้างอิง

1. พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522
2. กฎกระทรวง กำหนดการออกแบบโครงสร้างอาคาร และลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร พ.ศ.2566
3. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต (ปรับปรุงครั้งที่ 2) พ.ศ. 2550
4. มาตรฐาน ACI 318M-11 Building Code Requirements for Structural Concrete
5. มาตรฐาน ASTM C 1152/C 1152M : Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete
6. มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ.1101: มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก
7. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15: ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
8. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2594: ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

ตารางที่ ก-1 ค่า Error function, $erf(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-n^2} dn$

z	erf (z)	z	erf (z)	z	erf (z)	z	erf (z)
0.01	0.011	0.51	0.529	1.01	0.847	1.51	0.967
0.02	0.023	0.52	0.538	1.02	0.851	1.52	0.968
0.03	0.034	0.53	0.546	1.03	0.855	1.53	0.970
0.04	0.045	0.54	0.555	1.04	0.859	1.54	0.971
0.05	0.056	0.55	0.563	1.05	0.862	1.55	0.972
0.06	0.068	0.56	0.572	1.06	0.866	1.56	0.973
0.07	0.079	0.57	0.580	1.07	0.870	1.57	0.974
0.08	0.090	0.58	0.588	1.08	0.873	1.58	0.975
0.09	0.101	0.59	0.596	1.09	0.877	1.59	0.975
0.10	0.112	0.60	0.604	1.10	0.880	1.60	0.976
0.11	0.124	0.61	0.612	1.11	0.884	1.61	0.977
0.12	0.135	0.62	0.619	1.12	0.887	1.62	0.978
0.13	0.146	0.63	0.627	1.13	0.890	1.63	0.979
0.14	0.157	0.64	0.635	1.14	0.893	1.64	0.980
0.15	0.168	0.65	0.642	1.15	0.896	1.65	0.980
0.16	0.179	0.66	0.649	1.16	0.899	1.66	0.981
0.17	0.190	0.67	0.657	1.17	0.902	1.67	0.982
0.18	0.201	0.68	0.664	1.18	0.905	1.68	0.982
0.19	0.212	0.69	0.671	1.19	0.908	1.69	0.983
0.20	0.223	0.70	0.678	1.20	0.910	1.70	0.984
0.21	0.234	0.71	0.685	1.21	0.913	1.71	0.984
0.22	0.244	0.72	0.691	1.22	0.916	1.72	0.985
0.23	0.255	0.73	0.698	1.23	0.918	1.73	0.986
0.24	0.266	0.74	0.705	1.24	0.921	1.74	0.986
0.25	0.276	0.75	0.711	1.25	0.923	1.75	0.987
0.26	0.287	0.76	0.718	1.26	0.925	1.76	0.987
0.27	0.297	0.77	0.724	1.27	0.928	1.77	0.988
0.28	0.308	0.78	0.730	1.28	0.930	1.78	0.988
0.29	0.318	0.79	0.736	1.29	0.932	1.79	0.989
0.30	0.329	0.80	0.742	1.30	0.934	1.80	0.989
0.31	0.339	0.81	0.748	1.31	0.936	1.81	0.990
0.32	0.349	0.82	0.754	1.32	0.938	1.82	0.990
0.33	0.359	0.83	0.760	1.33	0.940	1.83	0.990
0.34	0.369	0.84	0.765	1.34	0.942	1.84	0.991
0.35	0.379	0.85	0.771	1.35	0.944	1.85	0.991
0.36	0.389	0.86	0.776	1.36	0.946	1.86	0.991
0.37	0.399	0.87	0.781	1.37	0.947	1.87	0.992
0.38	0.409	0.88	0.787	1.38	0.949	1.88	0.992
0.39	0.419	0.89	0.792	1.39	0.951	1.89	0.992
0.40	0.428	0.90	0.797	1.40	0.952	1.90	0.993
0.41	0.438	0.91	0.802	1.41	0.954	1.91	0.993
0.42	0.447	0.92	0.807	1.42	0.955	1.92	0.993
0.43	0.457	0.93	0.812	1.43	0.957	1.93	0.994
0.44	0.466	0.94	0.816	1.44	0.958	1.94	0.994
0.45	0.475	0.95	0.821	1.45	0.960	1.95	0.994
0.46	0.485	0.96	0.825	1.46	0.961	1.96	0.994
0.47	0.494	0.97	0.830	1.47	0.962	1.97	0.995
0.48	0.503	0.98	0.834	1.48	0.964	1.98	0.995
0.49	0.512	0.99	0.839	1.49	0.965	1.99	0.995
0.50	0.520	1.00	0.843	1.50	0.966	2.00	0.995

ตารางที่ ก-2 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) สำหรับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน (f/b = 0) เฉพาะกรณีที่ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางถึงตำแหน่งของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีต 1 เมตร และภูมิประเทศไม่มีสิ่งกีดขวาง

w/b	บริเวณ / X^* (ม.)	อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 10 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 20 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 30 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 40 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 50 ปี		
		อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง
0.30	0	0.767	2.174	3.055	1.049	2.973	4.180	1.153	3.267	4.593	1.191	3.376	4.745	1.206	3.415	4.801
	100	0.721	1.616	2.492	0.986	2.211	3.409	1.083	2.429	3.747	1.119	2.510	3.871	1.132	2.539	3.916
	250	0.656	1.036	1.836	0.897	1.417	2.512	0.986	1.557	2.760	1.019	1.609	2.852	1.031	1.628	2.885
	500	0.561	0.494	1.104	0.767	0.675	1.510	0.843	0.742	1.659	0.871	0.767	1.714	0.881	0.776	1.734
	1,000	0.410	0.112	0.399	0.561	0.153	0.545	0.616	0.169	0.599	0.636	0.174	0.619	0.644	0.176	0.626
0.40	0	0.916	2.595	3.648	1.253	3.550	4.991	1.377	3.902	5.484	1.423	4.031	5.666	1.439	4.078	5.733
	100	0.860	1.930	2.976	1.177	2.640	4.071	1.293	2.901	4.474	1.336	2.997	4.622	1.352	3.032	4.676
	250	0.783	1.237	2.193	1.071	1.692	2.999	1.177	1.860	3.296	1.216	1.921	3.405	1.231	1.944	3.445
	500	0.670	0.590	1.318	0.916	0.807	1.802	1.006	0.886	1.981	1.040	0.916	2.046	1.052	0.927	2.071
	1,000	0.489	0.134	0.476	0.669	0.183	0.651	0.736	0.201	0.715	0.760	0.208	0.739	0.769	0.210	0.748
0.50	0	1.032	2.923	4.108	1.411	3.998	5.620	1.551	4.393	6.176	1.602	4.539	6.380	1.621	4.592	6.456
	100	0.969	2.173	3.351	1.325	2.972	4.584	1.456	3.266	5.038	1.505	3.375	5.205	1.522	3.414	5.266
	250	0.882	1.393	2.469	1.206	1.906	3.377	1.326	2.094	3.712	1.370	2.163	3.834	1.386	2.189	3.880
	500	0.754	0.664	1.484	1.031	0.908	2.030	1.133	0.998	2.231	1.171	1.031	2.304	1.185	1.043	2.332
	1,000	0.551	0.151	0.536	0.754	0.206	0.733	0.828	0.227	0.806	0.856	0.234	0.832	0.866	0.237	0.842
0.60	0	1.126	3.190	4.484	1.540	4.364	6.134	1.693	4.795	6.741	1.749	4.954	6.964	1.769	5.013	7.046
	100	1.057	2.372	3.658	1.447	3.244	5.004	1.590	3.565	5.499	1.642	3.683	5.681	1.662	3.727	5.748
	250	0.963	1.520	2.695	1.317	2.080	3.686	1.447	2.286	4.051	1.495	2.361	4.185	1.513	2.389	4.235
	500	0.823	0.725	1.620	1.126	0.991	2.215	1.237	1.089	2.435	1.278	1.125	2.515	1.293	1.139	2.545
	1,000	0.601	0.165	0.585	0.823	0.225	0.800	0.904	0.247	0.879	0.934	0.256	0.908	0.945	0.259	0.919

หมายเหตุ X คือ ระยะทางจากแนวชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดิน หน่วยเป็นเมตร แต่ไม่เกิน 1,000 เมตร

ตารางที่ ก-2 (ต่อ)

w/b	บริเวณ / X^* (ม.)	อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 75 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 100 ปี		
		อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง
0.30	0	1.213	3.437	4.831	1.214	3.438	4.833
	100	1.139	2.555	3.941	1.140	2.556	3.943
	250	1.037	1.638	2.903	1.038	1.639	2.905
	500	0.887	0.781	1.745	0.887	0.781	1.746
	1,000	0.648	0.177	0.630	0.648	0.177	0.631
0.40	0	1.448	4.104	5.769	1.449	4.106	5.772
	100	1.360	3.051	4.706	1.361	3.053	4.708
	250	1.238	1.956	3.467	1.239	1.957	3.469
	500	1.059	0.932	2.083	1.059	0.933	2.085
	1,000	0.774	0.212	0.752	0.774	0.212	0.753
0.50	0	1.631	4.621	6.496	1.632	4.623	6.499
	100	1.532	3.436	5.299	1.533	3.437	5.301
	250	1.394	2.203	3.904	1.395	2.204	3.906
	500	1.192	1.050	2.346	1.193	1.050	2.347
	1,000	0.871	0.239	0.847	0.872	0.239	0.848
0.60	0	1.780	5.044	7.090	1.781	5.046	7.094
	100	1.672	3.750	5.783	1.673	3.752	5.786
	250	1.522	2.404	4.261	1.523	2.405	4.263
	500	1.301	1.146	2.561	1.302	1.146	2.562
	1,000	0.951	0.260	0.925	0.951	0.260	0.925

หมายเหตุ X คือ ระยะทางจากแนวชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดิน หน่วยเป็นเมตร แต่ไม่เกิน 1,000 เมตร

ตารางที่ ก-3 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 (f/b = 0.2) เฉพาะกรณีที่ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางถึงตำแหน่งของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีต 1 เมตร และภูมิประเทศไม่มีสิ่งกีดขวาง

w/b	บริเวณ / X* (ม.)	อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 10 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 20 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 30 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 40 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 50 ปี		
		อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง
0.30	0	0.681	1.928	2.711	0.931	2.638	3.708	1.023	2.899	4.075	1.057	2.995	4.210	1.069	3.030	4.259
	100	0.639	1.434	2.211	0.874	1.961	3.025	0.961	2.155	3.324	0.993	2.226	3.434	1.004	2.253	3.474
	250	0.582	0.919	1.629	0.796	1.257	2.228	0.875	1.382	2.449	0.904	1.427	2.530	0.914	1.444	2.560
	500	0.497	0.438	0.979	0.680	0.599	1.339	0.748	0.659	1.472	0.773	0.680	1.520	0.782	0.688	1.538
	1,000	0.364	0.100	0.354	0.497	0.136	0.484	0.547	0.150	0.532	0.565	0.155	0.549	0.571	0.156	0.556
0.40	0	0.813	2.303	3.237	1.112	3.150	4.427	1.222	3.461	4.865	1.262	3.576	5.027	1.277	3.618	5.086
	100	0.763	1.712	2.640	1.044	2.342	3.612	1.147	2.573	3.969	1.185	2.659	4.100	1.199	2.690	4.149
	250	0.695	1.097	1.945	0.950	1.501	2.661	1.044	1.650	2.924	1.079	1.704	3.021	1.092	1.724	3.056
	500	0.594	0.523	1.169	0.812	0.716	1.599	0.893	0.786	1.757	0.922	0.812	1.815	0.933	0.822	1.837
	1,000	0.434	0.119	0.422	0.594	0.163	0.578	0.653	0.179	0.635	0.674	0.185	0.656	0.682	0.187	0.663
0.50	0	0.915	2.593	3.645	1.252	3.547	4.986	1.376	3.898	5.479	1.421	4.027	5.660	1.438	4.074	5.727
	100	0.860	1.928	2.973	1.176	2.637	4.067	1.292	2.898	4.469	1.335	2.994	4.617	1.351	3.029	4.672
	250	0.782	1.236	2.190	1.070	1.690	2.996	1.176	1.858	3.293	1.215	1.919	3.402	1.229	1.942	3.442
	500	0.669	0.589	1.316	0.915	0.806	1.801	1.005	0.885	1.979	1.039	0.915	2.044	1.051	0.926	2.068
	1,000	0.489	0.134	0.475	0.669	0.183	0.650	0.735	0.201	0.715	0.759	0.208	0.738	0.768	0.210	0.747
0.60	0	0.999	2.830	3.978	1.366	3.871	5.442	1.501	4.254	5.980	1.551	4.395	6.178	1.570	4.447	6.251
	100	0.938	2.104	3.245	1.283	2.878	4.439	1.410	3.163	4.878	1.457	3.268	5.040	1.474	3.306	5.099
	250	0.854	1.349	2.391	1.168	1.845	3.270	1.284	2.028	3.594	1.326	2.095	3.713	1.342	2.119	3.757
	500	0.730	0.643	1.437	0.999	0.879	1.965	1.097	0.966	2.160	1.134	0.998	2.231	1.147	1.010	2.258
	1,000	0.534	0.146	0.519	0.730	0.200	0.710	0.802	0.220	0.780	0.829	0.227	0.806	0.838	0.230	0.815

หมายเหตุ X คือ ระยะทางจากแนวชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดิน หน่วยเป็นเมตร แต่ไม่เกิน 1,000 เมตร

ตารางที่ ก-3 (ต่อ)

w/b	บริเวณ / X^* (ม.)	อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 75 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 100 ปี		
		อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง
0.30	0	1.076	3.049	4.286	1.077	3.050	4.288
	100	1.011	2.267	3.496	1.011	2.268	3.498
	250	0.920	1.453	2.576	0.920	1.454	2.577
	500	0.787	0.693	1.548	0.787	0.693	1.549
	1,000	0.575	0.157	0.559	0.575	0.157	0.559
0.40	0	1.285	3.641	5.117	1.286	3.642	5.120
	100	1.207	2.707	4.174	1.207	2.708	4.177
	250	1.099	1.735	3.075	1.099	1.736	3.077
	500	0.939	0.827	1.848	0.940	0.827	1.849
	1,000	0.686	0.188	0.668	0.687	0.188	0.668
0.50	0	1.447	4.099	5.763	1.448	4.102	5.766
	100	1.359	3.048	4.701	1.360	3.049	4.703
	250	1.237	1.954	3.463	1.238	1.955	3.465
	500	1.058	0.931	2.081	1.058	0.932	2.082
	1,000	0.773	0.212	0.752	0.773	0.212	0.752
0.60	0	1.579	4.474	6.290	1.580	4.477	6.293
	100	1.483	3.327	5.131	1.484	3.328	5.133
	250	1.350	2.133	3.780	1.351	2.134	3.782
	500	1.154	1.017	2.272	1.155	1.017	2.273
	1,000	0.844	0.231	0.820	0.844	0.231	0.821

หมายเหตุ X คือ ระยะทางจากแนวชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดิน หน่วยเป็นเมตร แต่ไม่เกิน 1,000 เมตร

ตารางที่ ก-4 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 (f/b = 0.3) เฉพาะกรณีที่ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางถึงตำแหน่งของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีต 1 เมตร และภูมิประเทศไม่มีสิ่งกีดขวาง

w/b	บริเวณ / X* (ม.)	อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 10 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 20 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 30 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 40 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 50 ปี		
		อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง
0.30	0	0.648	1.836	2.581	0.887	2.512	3.531	0.974	2.760	3.880	1.007	2.852	4.009	1.018	2.885	4.056
	100	0.609	1.365	2.106	0.833	1.868	2.880	0.915	2.052	3.165	0.945	2.120	3.270	0.957	2.145	3.309
	250	0.554	0.875	1.551	0.758	1.197	2.122	0.833	1.316	2.332	0.861	1.359	2.409	0.871	1.375	2.438
	500	0.474	0.417	0.932	0.648	0.571	1.275	0.712	0.627	1.401	0.736	0.648	1.448	0.744	0.656	1.465
	1,000	0.346	0.095	0.337	0.474	0.130	0.461	0.520	0.142	0.506	0.538	0.147	0.523	0.544	0.149	0.529
0.40	0	0.774	2.193	3.082	1.059	2.999	4.216	1.163	3.296	4.633	1.202	3.405	4.787	1.216	3.445	4.843
	100	0.727	1.630	2.514	0.994	2.230	3.439	1.093	2.451	3.779	1.129	2.532	3.905	1.142	2.562	3.951
	250	0.662	1.045	1.852	0.905	1.430	2.534	0.995	1.571	2.784	1.028	1.623	2.877	1.040	1.642	2.911
	500	0.566	0.498	1.113	0.774	0.681	1.523	0.850	0.749	1.673	0.878	0.774	1.729	0.889	0.783	1.749
	1,000	0.413	0.113	0.402	0.566	0.155	0.550	0.621	0.170	0.604	0.642	0.176	0.624	0.650	0.178	0.632
0.50	0	0.871	2.469	3.471	1.192	3.377	4.748	1.310	3.712	5.217	1.353	3.834	5.390	1.369	3.880	5.454
	100	0.819	1.836	2.831	1.120	2.511	3.873	1.230	2.760	4.256	1.271	2.851	4.397	1.286	2.885	4.449
	250	0.745	1.177	2.086	1.019	1.610	2.853	1.120	1.769	3.136	1.157	1.828	3.239	1.171	1.849	3.278
	500	0.637	0.561	1.254	0.871	0.767	1.715	0.957	0.843	1.884	0.989	0.871	1.947	1.001	0.881	1.970
	1,000	0.466	0.127	0.453	0.637	0.174	0.619	0.700	0.192	0.681	0.723	0.198	0.703	0.732	0.200	0.711
0.60	0	0.951	2.695	3.788	1.301	3.686	5.182	1.430	4.051	5.695	1.477	4.185	5.883	1.495	4.235	5.953
	100	0.893	2.004	3.090	1.222	2.741	4.227	1.343	3.012	4.645	1.387	3.112	4.799	1.404	3.148	4.856
	250	0.813	1.285	2.277	1.112	1.757	3.114	1.222	1.931	3.422	1.263	1.995	3.536	1.278	2.018	3.577
	500	0.695	0.612	1.368	0.951	0.837	1.872	1.045	0.920	2.057	1.080	0.951	2.125	1.092	0.962	2.150
	1,000	0.508	0.139	0.494	0.695	0.190	0.676	0.764	0.209	0.743	0.789	0.216	0.767	0.798	0.219	0.776

หมายเหตุ X คือ ระยะทางจากแนวชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดิน หน่วยเป็นเมตร แต่ไม่เกิน 1,000 เมตร

ตารางที่ ก-4 (ต่อ)

w/b	บริเวณ / X^* (ม.)	อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 75 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 100 ปี		
		อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง
0.30	0	1.025	2.903	4.081	1.025	2.905	4.083
	100	0.962	2.159	3.329	0.963	2.160	3.331
	250	0.876	1.384	2.453	0.877	1.385	2.454
	500	0.749	0.660	1.474	0.749	0.660	1.475
	1,000	0.547	0.150	0.532	0.548	0.150	0.533
0.40	0	1.224	3.467	4.873	1.224	3.469	4.876
	100	1.149	2.578	3.975	1.150	2.579	3.977
	250	1.046	1.652	2.929	1.047	1.653	2.930
	500	0.894	0.788	1.760	0.895	0.788	1.761
	1,000	0.654	0.179	0.636	0.654	0.179	0.636
0.50	0	1.378	3.904	5.488	1.379	3.906	5.490
	100	1.294	2.902	4.476	1.295	2.904	4.479
	250	1.178	1.861	3.298	1.179	1.862	3.300
	500	1.007	0.887	1.982	1.008	0.887	1.983
	1,000	0.736	0.201	0.716	0.736	0.202	0.716
0.60	0	1.504	4.261	5.990	1.505	4.263	5.993
	100	1.413	3.168	4.886	1.413	3.170	4.888
	250	1.286	2.031	3.600	1.286	2.032	3.601
	500	1.099	0.968	2.163	1.100	0.969	2.164
	1,000	0.803	0.220	0.781	0.804	0.220	0.782

หมายเหตุ X คือ ระยะทางจากแนวชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดิน หน่วยเป็นเมตร แต่ไม่เกิน 1,000 เมตร

ตารางที่ ก-5 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 (f/b = 0.4) เฉพาะกรณีที่ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางถึงตำแหน่งของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีต 1 เมตร และภูมิประเทศไม่มีสิ่งกีดขวาง

w/b	บริเวณ / X* (ม.)	อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 10 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 20 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 30 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 40 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 50 ปี		
		อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง
0.30	0	0.623	1.765	2.481	0.852	2.414	3.393	0.936	2.653	3.729	0.967	2.741	3.853	0.979	2.773	3.898
	100	0.585	1.312	2.024	0.800	1.795	2.768	0.879	1.972	3.042	0.909	2.038	3.143	0.919	2.062	3.180
	250	0.533	0.841	1.491	0.728	1.151	2.039	0.800	1.264	2.241	0.827	1.306	2.315	0.837	1.322	2.343
	500	0.455	0.401	0.896	0.623	0.548	1.226	0.684	0.603	1.347	0.707	0.623	1.391	0.715	0.630	1.408
	1,000	0.333	0.091	0.324	0.455	0.125	0.443	0.500	0.137	0.486	0.517	0.141	0.503	0.523	0.143	0.508
0.40	0	0.744	2.107	2.962	1.017	2.882	4.052	1.118	3.168	4.453	1.155	3.273	4.600	1.169	3.311	4.654
	100	0.699	1.567	2.416	0.956	2.143	3.305	1.050	2.355	3.632	1.085	2.433	3.752	1.098	2.462	3.797
	250	0.636	1.004	1.780	0.870	1.374	2.435	0.956	1.510	2.676	0.987	1.560	2.765	0.999	1.578	2.797
	500	0.544	0.479	1.070	0.744	0.655	1.463	0.817	0.720	1.608	0.844	0.743	1.661	0.854	0.752	1.681
	1,000	0.397	0.109	0.386	0.543	0.149	0.529	0.597	0.163	0.581	0.617	0.169	0.600	0.624	0.171	0.607
0.50	0	0.838	2.373	3.336	1.146	3.246	4.563	1.259	3.567	5.014	1.301	3.685	5.180	1.316	3.729	5.241
	100	0.787	1.764	2.721	1.076	2.413	3.722	1.182	2.652	4.090	1.222	2.740	4.226	1.236	2.772	4.275
	250	0.716	1.131	2.005	0.979	1.547	2.742	1.076	1.700	3.013	1.112	1.756	3.113	1.125	1.777	3.150
	500	0.612	0.539	1.205	0.837	0.737	1.648	0.920	0.810	1.811	0.951	0.837	1.871	0.962	0.847	1.893
	1,000	0.447	0.122	0.435	0.612	0.168	0.595	0.673	0.184	0.654	0.695	0.190	0.676	0.703	0.192	0.684
0.60	0	0.914	2.590	3.641	1.250	3.543	4.980	1.374	3.893	5.473	1.420	4.022	5.654	1.436	4.070	5.721
	100	0.859	1.926	2.970	1.174	2.634	4.062	1.291	2.895	4.464	1.333	2.990	4.612	1.349	3.026	4.666
	250	0.782	1.234	2.188	1.069	1.689	2.993	1.175	1.856	3.289	1.214	1.917	3.398	1.228	1.940	3.438
	500	0.668	0.588	1.315	0.914	0.805	1.799	1.004	0.884	1.977	1.038	0.914	2.042	1.050	0.925	2.066
	1,000	0.488	0.134	0.475	0.668	0.183	0.650	0.734	0.201	0.714	0.758	0.208	0.738	0.767	0.210	0.746

หมายเหตุ X คือ ระยะทางจากแนวชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดิน หน่วยเป็นเมตร แต่ไม่เกิน 1,000 เมตร

ตารางที่ ก-5 (ต่อ)

w/b	บริเวณ / X^* (ม.)	อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 75 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 100 ปี		
		อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง
0.30	0	0.985	2.790	3.922	0.985	2.792	3.924
	100	0.925	2.075	3.199	0.925	2.076	3.201
	250	0.842	1.330	2.357	0.842	1.331	2.358
	500	0.720	0.634	1.417	0.720	0.634	1.417
	1,000	0.526	0.144	0.512	0.526	0.144	0.512
0.40	0	1.176	3.332	4.683	1.177	3.333	4.686
	100	1.104	2.477	3.820	1.105	2.478	3.822
	250	1.005	1.588	2.815	1.006	1.589	2.816
	500	0.859	0.757	1.692	0.860	0.757	1.692
	1,000	0.628	0.172	0.611	0.629	0.172	0.611
0.50	0	1.324	3.752	5.274	1.325	3.754	5.277
	100	1.244	2.789	4.302	1.244	2.791	4.304
	250	1.132	1.788	3.169	1.133	1.789	3.171
	500	0.968	0.852	1.905	0.968	0.853	1.906
	1,000	0.707	0.194	0.688	0.708	0.194	0.688
0.60	0	1.445	4.095	5.756	1.446	4.097	5.759
	100	1.357	3.045	4.696	1.358	3.046	4.698
	250	1.236	1.952	3.459	1.236	1.953	3.461
	500	1.056	0.930	2.079	1.057	0.931	2.080
	1,000	0.772	0.211	0.751	0.772	0.211	0.751

หมายเหตุ X คือ ระยะทางจากแนวชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดิน หน่วยเป็นเมตร แต่ไม่เกิน 1,000 เมตร

ตารางที่ ก-6 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 (f/b = 0.5) เฉพาะกรณีที่ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางถึงตำแหน่งของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีต 1 เมตร และภูมิประเทศไม่มีสิ่งกีดขวาง

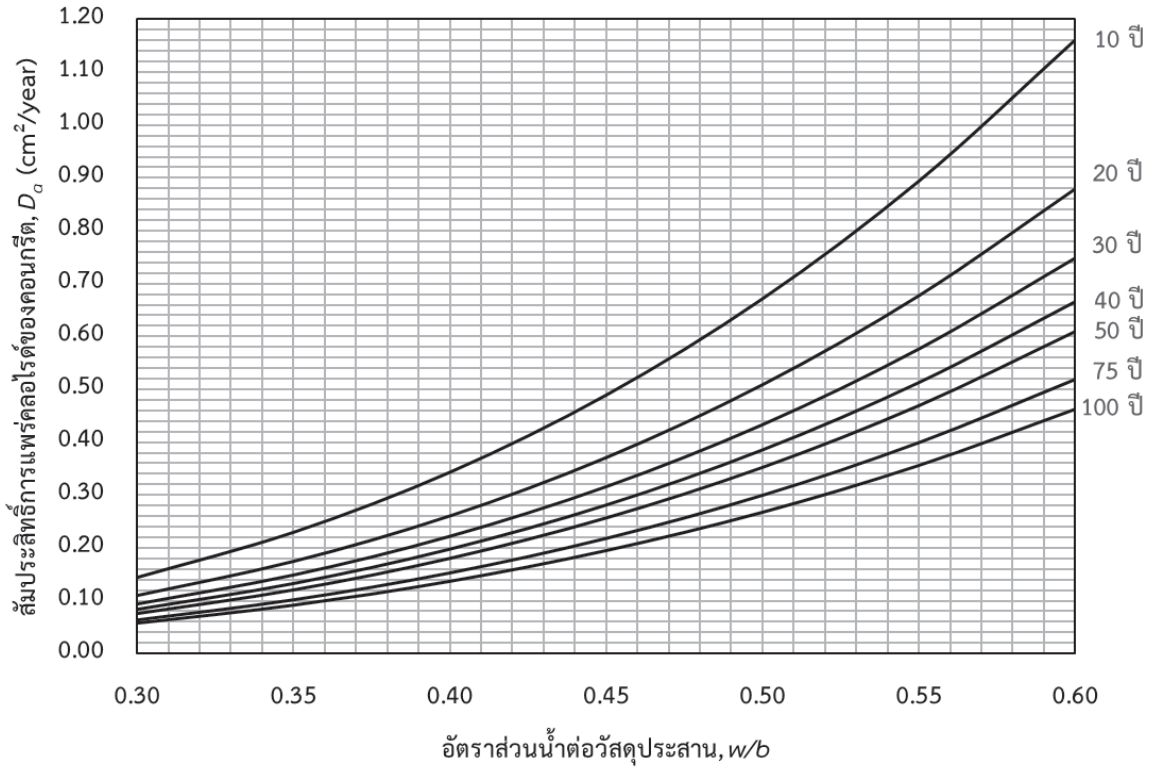
w/b	บริเวณ / X* (ม.)	อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 10 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 20 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 30 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 40 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 50 ปี		
		อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง
0.30	0	0.605	1.714	2.409	0.827	2.344	3.295	0.909	2.576	3.621	0.939	2.661	3.741	0.950	2.693	3.785
	100	0.568	1.274	1.965	0.777	1.743	2.688	0.854	1.915	2.954	0.882	1.979	3.052	0.893	2.002	3.088
	250	0.517	0.817	1.448	0.707	1.117	1.980	0.777	1.228	2.176	0.803	1.268	2.248	0.813	1.283	2.275
	500	0.442	0.389	0.870	0.605	0.533	1.190	0.665	0.585	1.308	0.687	0.605	1.351	0.695	0.612	1.367
	1,000	0.323	0.088	0.314	0.442	0.121	0.430	0.486	0.133	0.472	0.502	0.137	0.488	0.508	0.139	0.494
0.40	0	0.722	2.046	2.876	0.988	2.799	3.934	1.086	3.076	4.324	1.122	3.178	4.467	1.135	3.215	4.520
	100	0.678	1.521	2.346	0.928	2.081	3.209	1.020	2.287	3.527	1.053	2.363	3.644	1.066	2.390	3.687
	250	0.617	0.975	1.729	0.845	1.334	2.365	0.928	1.466	2.598	0.959	1.515	2.685	0.970	1.532	2.716
	500	0.528	0.465	1.039	0.722	0.636	1.421	0.793	0.699	1.562	0.820	0.722	1.613	0.829	0.730	1.632
	1,000	0.386	0.106	0.375	0.528	0.144	0.513	0.580	0.159	0.564	0.599	0.164	0.583	0.606	0.166	0.590
0.50	0	0.813	2.304	3.239	1.112	3.152	4.430	1.223	3.464	4.869	1.263	3.578	5.030	1.278	3.621	5.089
	100	0.764	1.713	2.642	1.045	2.343	3.614	1.148	2.575	3.972	1.186	2.660	4.103	1.200	2.692	4.152
	250	0.695	1.098	1.947	0.951	1.502	2.663	1.045	1.651	2.926	1.080	1.706	3.023	1.092	1.726	3.059
	500	0.594	0.523	1.170	0.813	0.716	1.600	0.894	0.787	1.758	0.923	0.813	1.817	0.934	0.823	1.838
	1,000	0.434	0.119	0.423	0.594	0.163	0.578	0.653	0.179	0.635	0.675	0.185	0.656	0.683	0.187	0.664
0.60	0	0.888	2.515	3.535	1.214	3.440	4.836	1.334	3.780	5.314	1.379	3.906	5.490	1.395	3.952	5.555
	100	0.834	1.870	2.884	1.140	2.558	3.945	1.253	2.811	4.335	1.295	2.904	4.478	1.310	2.938	4.531
	250	0.759	1.199	2.125	1.038	1.640	2.906	1.141	1.802	3.194	1.179	1.862	3.299	1.192	1.884	3.338
	500	0.649	0.571	1.277	0.887	0.782	1.747	0.975	0.859	1.919	1.008	0.887	1.983	1.019	0.898	2.006
	1,000	0.474	0.130	0.461	0.649	0.178	0.631	0.713	0.195	0.693	0.736	0.202	0.716	0.745	0.204	0.725

หมายเหตุ X คือ ระยะทางจากแนวชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดิน หน่วยเป็นเมตร แต่ไม่เกิน 1,000 เมตร

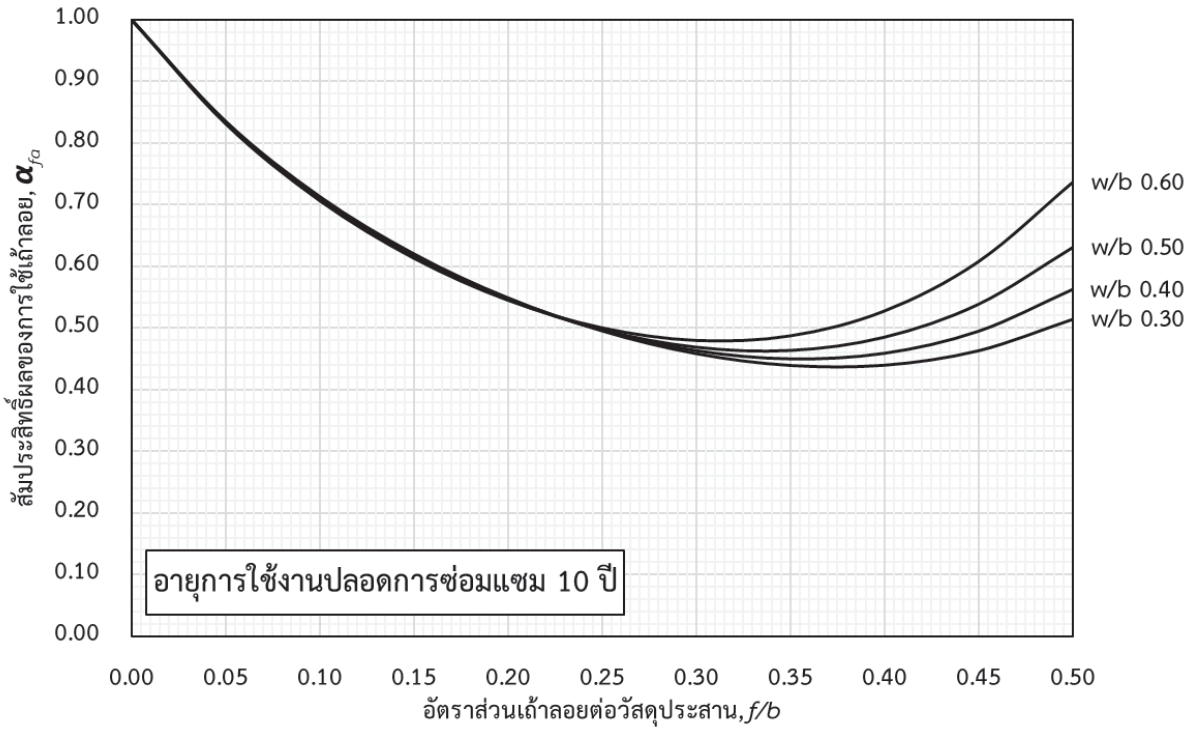
ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

w/b	บริเวณ / X^* (ม.)	อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 75 ปี			อายุการใช้งาน t_r (ปี) = 100 ปี		
		อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง	อ่าวไทยตอนบน	ทะเลอันดามัน	อ่าวไทยตอนล่าง
0.30	0	0.956	2.709	3.809	0.957	2.711	3.811
	100	0.898	2.014	3.107	0.899	2.015	3.108
	250	0.818	1.291	2.289	0.818	1.292	2.290
	500	0.699	0.616	1.376	0.699	0.616	1.376
	1,000	0.511	0.140	0.497	0.511	0.140	0.497
0.40	0	1.142	3.235	4.548	1.142	3.237	4.550
	100	1.072	2.405	3.710	1.073	2.407	3.712
	250	0.976	1.542	2.733	0.977	1.543	2.734
	500	0.835	0.735	1.643	0.835	0.735	1.643
	1,000	0.610	0.167	0.593	0.610	0.167	0.594
0.50	0	1.286	3.643	5.121	1.286	3.645	5.124
	100	1.208	2.709	4.177	1.208	2.710	4.180
	250	1.099	1.736	3.078	1.100	1.737	3.079
	500	0.940	0.828	1.850	0.940	0.828	1.851
	1,000	0.687	0.188	0.668	0.687	0.188	0.668
0.60	0	1.403	3.976	5.590	1.404	3.978	5.592
	100	1.318	2.956	4.560	1.319	2.958	4.562
	250	1.200	1.895	3.359	1.200	1.896	3.361
	500	1.026	0.903	2.019	1.026	0.904	2.020
	1,000	0.750	0.205	0.729	0.750	0.205	0.730

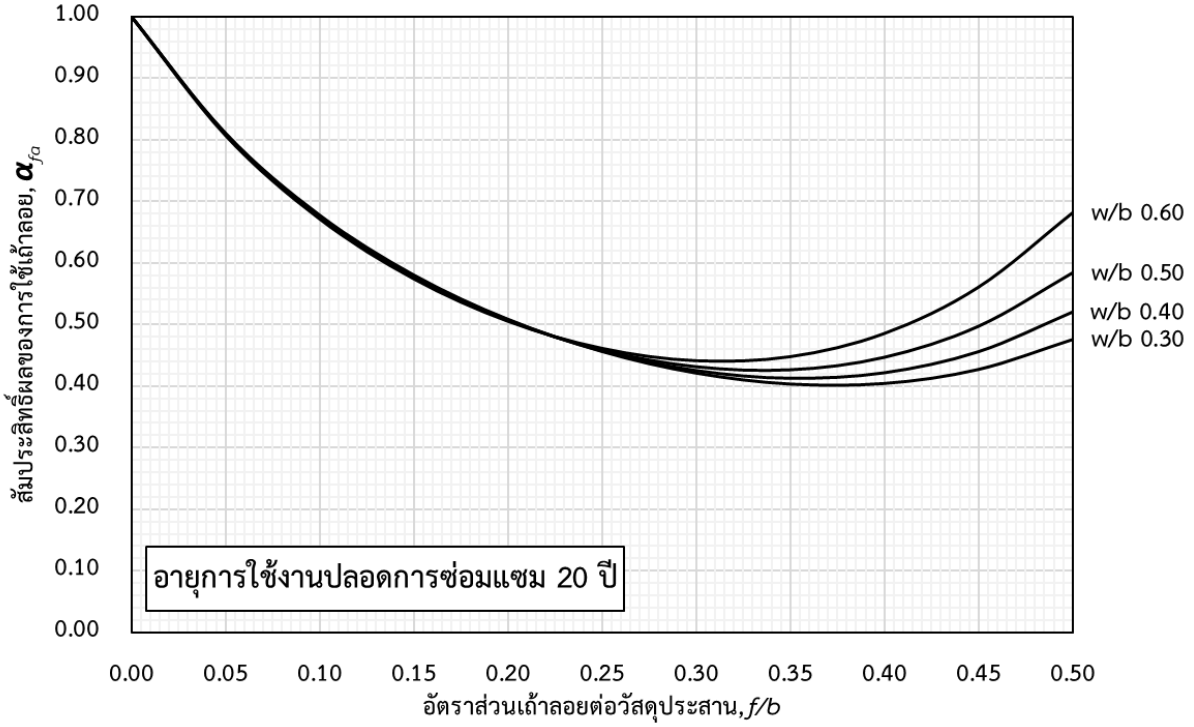
หมายเหตุ X คือ ระยะทางจากแนวชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดิน หน่วยเป็นเมตร แต่ไม่เกิน 1,000 เมตร



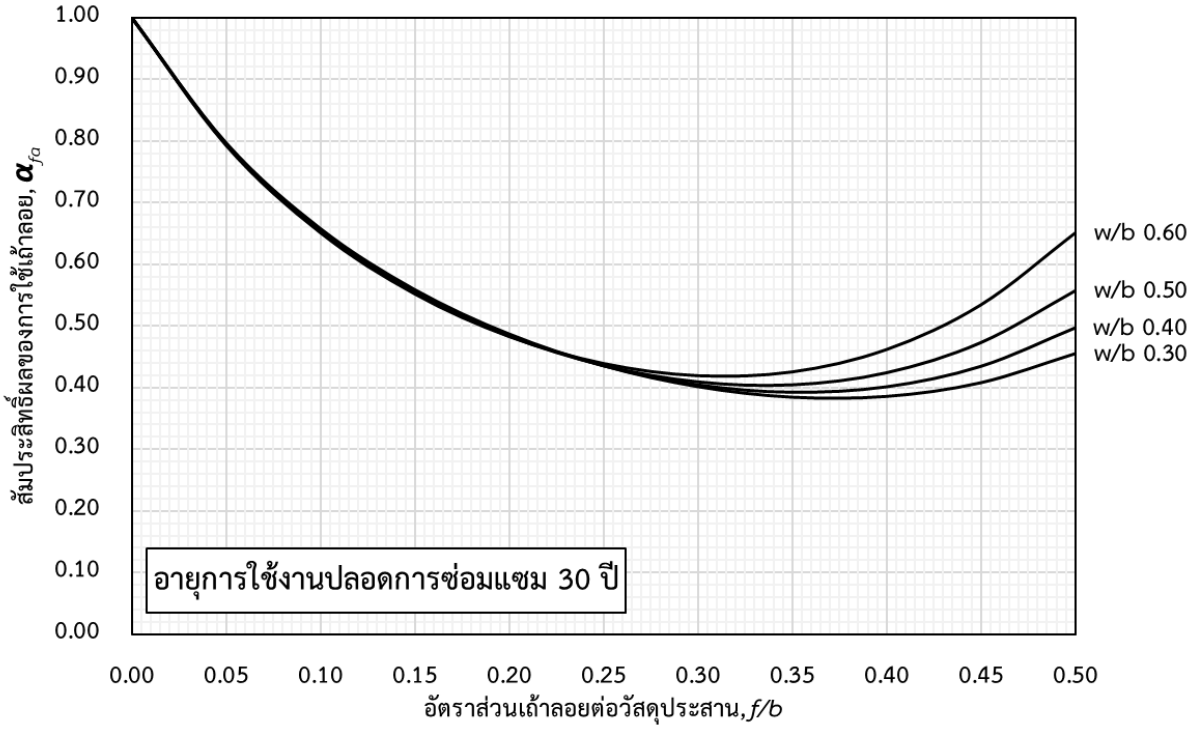
รูปที่ ก-1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ไม่แตกร้าว และใช้ปูนซีเมนต์ล้วน



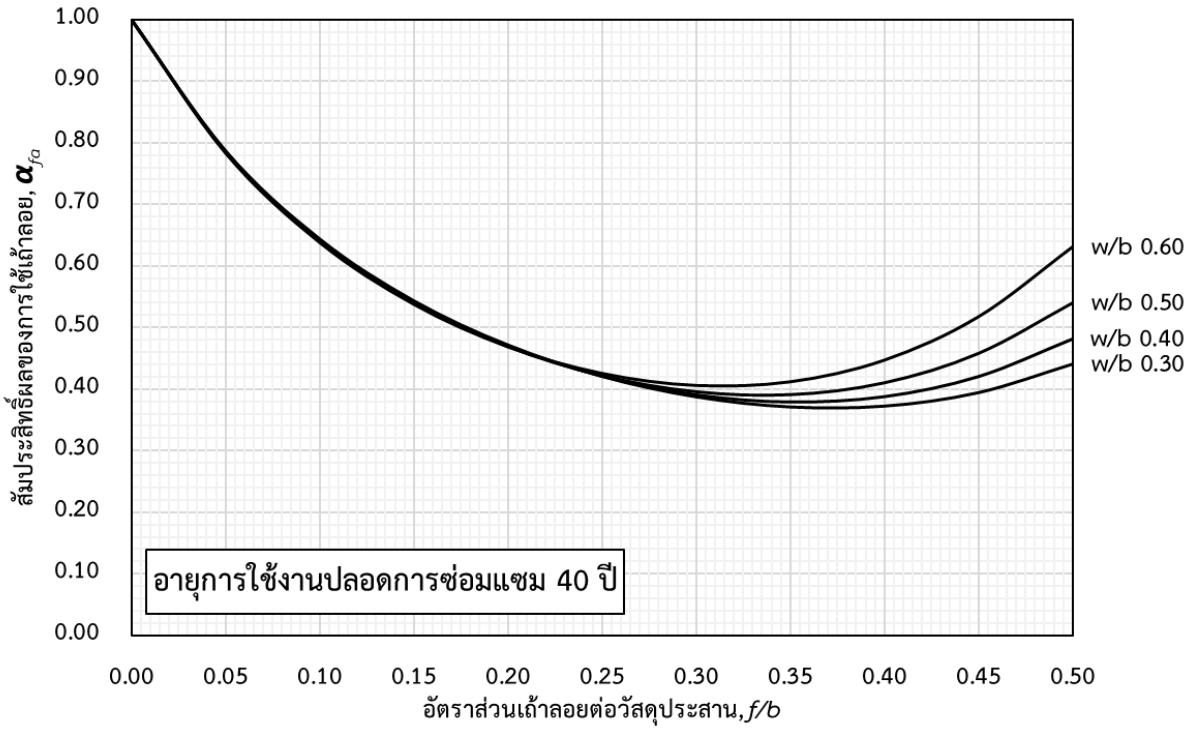
รูปที่ ก-2 สัมประสิทธิ์ผลของการใช้เถ้าลอย ในคอนกรีตที่ไม่แตกร้าว (อายุการใช้งาน 10 ปี)



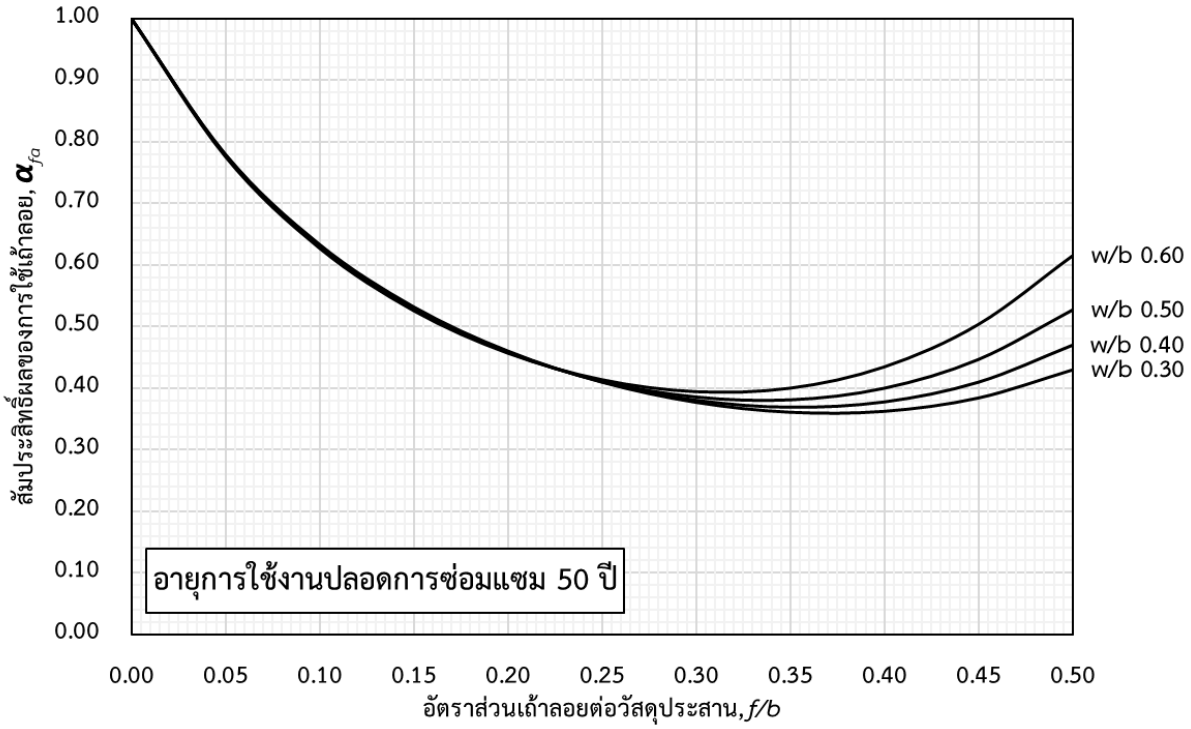
รูปที่ ก-3 สัมประสิทธิ์ผลของการใช้เถ้าลอย ในคอนกรีตที่ไม่แตกร้าว (อายุการใช้งาน 20 ปี)



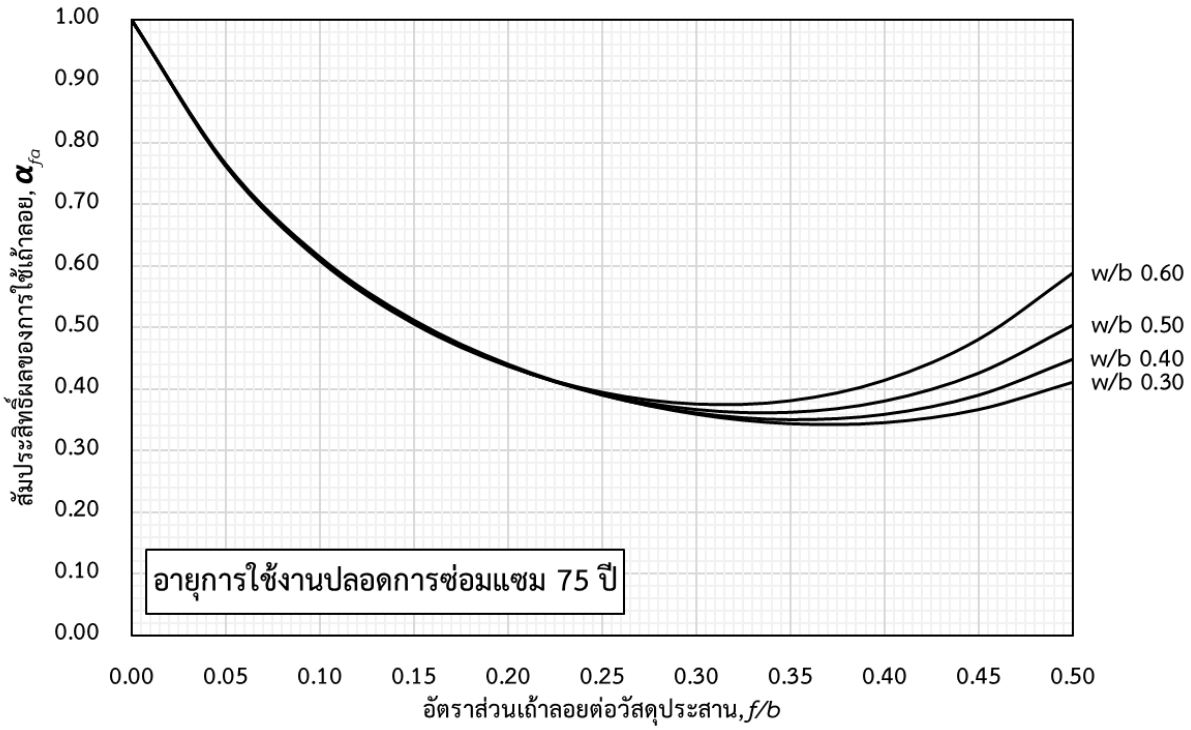
รูปที่ ก-4 สัมประสิทธิ์ผลของการใช้เถ้าลอย ในคอนกรีตที่ไม่แตกร้าว (อายุการใช้งาน 30 ปี)



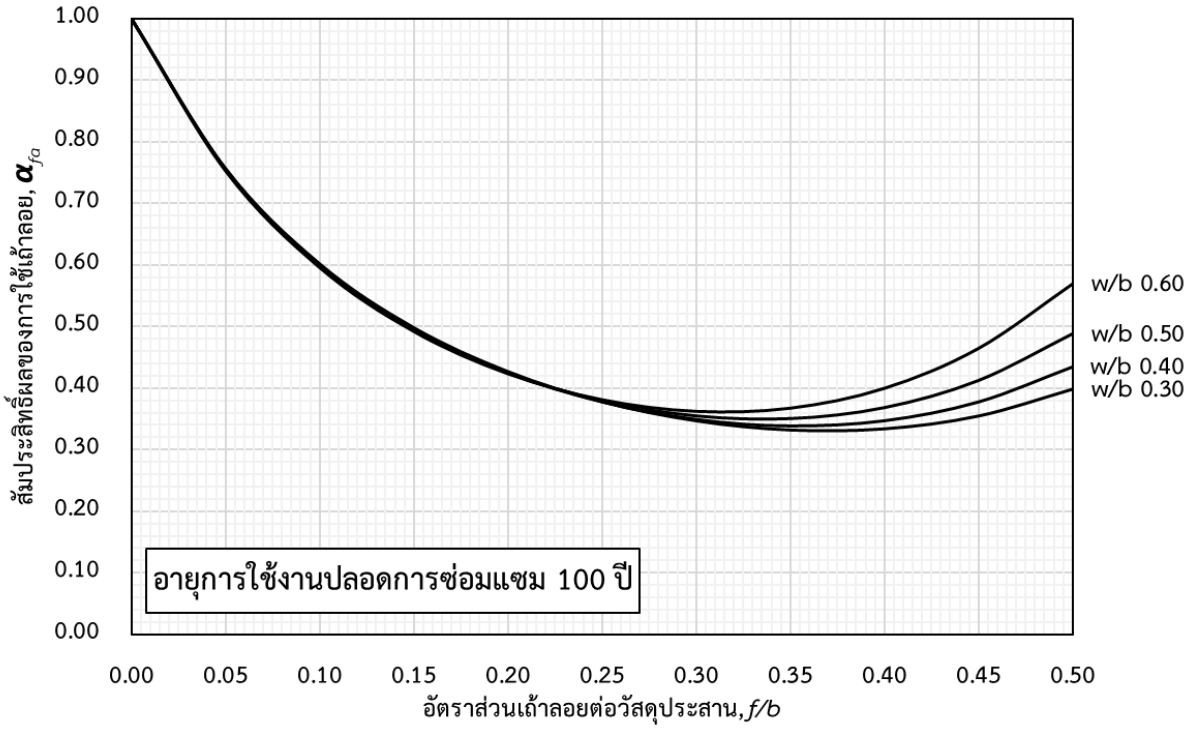
รูปที่ ก-5 สัมประสิทธิ์ผลของการใช้เถ้าลอย ในคอนกรีตที่ไม่แตกร้าว (อายุการใช้งาน 40 ปี)



รูปที่ ก-6 สัมประสิทธิ์ผลของการใช้เถ้าลอย ในคอนกรีตที่ไม่แตกร้าว (อายุการใช้งาน 50 ปี)



รูปที่ ก-7 สัมประสิทธิ์ผลของการใช้เถ้าลอย ในคอนกรีตที่ไม่แตกร้าว (อายุการใช้งาน 75 ปี)



รูปที่ ก-8 สัมประสิทธิ์ผลของการใช้เถ้าลอย ในคอนกรีตที่ไม่แตกร้าว (อายุการใช้งาน 100 ปี)

ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ

ข1 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์จากน้ำทะเล

<u>ตัวอย่างที่ 1</u> โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตั้งอยู่ในทะเลบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (tidal zone) หรือบริเวณสัมผัสคลื่นและละอองคลื่น (splash zone)

จงออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ สำหรับหล่อคาน (Girder) ของท่าเทียบเรือ (Jetty) ในทะเล โดยกำหนดอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซม (repair-free service life) 20 ปี

<u>วิธีคำนวณ</u>

1. กรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และกรณีใช้ปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูน

จากข้อแนะนำในหัวข้อที่ 4.2 เมื่อพิจารณาโครงสร้างคานของท่าเทียบเรือในทะเลแล้วถือว่าอยู่ในสภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมระดับรุนแรง โดยอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมคลอไรด์ที่อยู่ห่างจากชายฝั่งน้อยกว่า 100 เมตร ดังนั้น จากตารางที่ 6 กำหนดให้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด ต้องไม่เกิน 0.45

ดังนั้น จากตารางที่ 3 สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน $w/b < 0.45$ จะได้ ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม (α) เท่ากับ 0.9

จากตารางที่ 5 ซึ่งใช้สำหรับโครงสร้างที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม จะได้ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (C_0) 65 มม. [คอนกรีตหล่อในที่ ทั้งอัดแรงและไม่อัดแรง >> องค์อาคารอื่น]

ดังนั้น จากสมการที่ (4.1-ข) และตารางที่ 3 จะได้

ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด $c_{\min} \geq \alpha c_0$

$c_{\min} \geq 0.9 \times 65 = 58.5$ มม.

จากสมการที่ (4.1-ก) จะได้

ระยะหุ้มเหล็กเสริม $c \geq c_{\min}$

$c \geq 58.5$ มม.

หากสมมุติให้ กรณีนี้ต้องการใช้ผงหินปูน โดยใช้สัดส่วนผงหินปูนต่อวัสดุประสานไม่เกิน 15%

จากตารางที่ 9 จะได้ $C_{\lim} = 0.45$ % โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

จากสมการที่ (5.1-ก) $C_d \leq C_{\lim}$

จะได้ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ตำแหน่งผิวเหล็กเสริมทั้งหมด (ที่อยู่ในส่วนผสมคอนกรีต + ที่แทรกซึมมาจากสิ่งแวดล้อมภายนอก)

$$C_d \leq 0.45 \qquad \text{----------(1)}$$

เนื่องจากโครงสร้างต้องเผชิญกับสัมผัสคลื่นและละอองคลื่น (splash zone) ดังนั้นจากตารางที่ 10 จะได้

$C_s^{'} = 1.233$ % โดยน้ำหนักของคอนกรีต

จากสมการที่ (5.1-ค) เมื่อออกแบบคอนกรีตให้มีหน่วยน้ำหนักคอนกรีต (ρ_c) 2,400 กก. และมีน้ำหนักวัสดุประสาน (b) 350 กก. ต่อปริมาตรคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร

จะได้ $C_s = 1.233 \times \frac{2,400}{350} = 8.455$ % โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

เนื่องจากใช้น้ำประปา และทรายแม่น้ำในการหล่อคอนกรีต และไม่มีการใช้สารผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ ดังนั้น ไม่มีคลอไรด์ที่ผสมอยู่ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น $C_0 = 0$

จากสมการที่ (5.1-ข) $C_d = (C_s - C_0)\left[1 - erf\left(\frac{c}{2\sqrt{D_a t_r}}\right)\right]$

แทนค่า C_d, C_0 และ c จะได้

$$0.45 = 8.455\left[1 - erf\left(\frac{5.85}{2\sqrt{D_a \times 20}}\right)\right]$$

$$erf\left(\frac{5.85}{2\sqrt{20D_a}}\right) = \left[1 - \frac{0.45}{8.455}\right]$$

$$erf\left(\frac{5.85}{2\sqrt{20D_a}}\right) = 0.947$$

$$\therefore \left(\frac{5.85}{2\sqrt{20D_a}}\right) = 1.37$$

$D_a = 0.2279$ ซม.^{2} ปี$^{-1}$ ----------(2)

จากสมการที่ (5.1-จ) $D_a = D_k + D_0$

จากสมการที่ (5.1-ฉ) $D_0 = 0.05\ W$

จากตารางที่ 7 ในสภาวะเสี่ยงต่อการเกิดสนิมรุนแรง ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวที่มากที่สุดที่ยอมให้ได้ (W) = 0.0035 × 58.5 = 0.2048 มม.

ดังนั้น $D_a = D_k + (0.05 \times 0.2048)$

$\therefore$ $D_a = D_k + 0.0102$ ----------(3)

(2) = (3); $0.2279 = D_k + 0.0102$

$\therefore$ $D_k = (0.2279 - 0.0102) = 0.2177$ ซม.^{2} ปี$^{-1}$

จากสมการที่ (5.1-ช) หรือ จากรูปที่ ก-1 กรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และกรณีใช้ปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนไม่เกิน 15%: เมื่อ t_r = 20 ปี

ถ้า w/b = 0.37 ทำให้ได้ค่า D_k = 0.2063 ซม.^{2} ปี$^{-1}$ และ

ถ้า w/b = 0.38 ทำให้ได้ค่า D_k = 0.2235 ซม.^{2} ปี$^{-1}$

ดังนั้น w/b ที่มีค่ามากที่สุดที่ทำให้ได้ค่า D_k ไม่เกินเกณฑ์ที่ต้องการ (D_k = 0.2177 ซม.^{2} ปี$^{-1}$) คือ 0.37

2. กรณีใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย และกรณีใช้ปูนซีเมนต์ผสมทั้งเถ้าลอยและผงหินปูน

จากข้อแนะนำในหัวข้อที่ 4.2 เมื่อพิจารณาโครงสร้างคานของท่าเทียบเรือในทะเลแล้วถือว่าอยู่ในสภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมระดับรุนแรง เนื่องจากอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมคลอไรด์ที่อยู่ห่างจากชายฝั่งน้อยกว่า 100 เมตร ดังนั้น จากตารางที่ 6 กำหนดให้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด ต้องไม่เกิน 0.45

ดังนั้น จากตารางที่ 3 สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน $w/b < 0.45$ จะได้ ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม (α) เท่ากับ 0.9

จากตารางที่ 5 ซึ่งใช้สำหรับโครงสร้างที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม จะได้ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (C_0) 65 มม. [คอนกรีตหล่อในที่ ทั้งอัดแรงและไม่อัดแรง >> องค์อาคารอื่น]

ดังนั้น จากสมการที่ (4.1-ข) และตารางที่ 3 จะได้

ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด $c_{\min} \geq \alpha\, c_0$

$c_{\min} \geq 0.9 \times 65 = 58.5$ มม.

จากสมการที่ (4.1-ก) จะได้

ระยะหุ้มเหล็กเสริม $c \geq c_{\min}$

$c \geq 58.5$ มม.

หากสมมุติให้ กรณีนี้ต้องการใช้เถ้าลอย โดยใช้สัดส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน 30%

จากตารางที่ 9 จะได้ $C_{\lim} = 0.35$ % โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

จากสมการที่ (5.1-ก) $C_d \leq C_{\lim}$

จะได้ ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ตำแหน่งผิวเหล็กเสริมทั้งหมด (ที่อยู่ในส่วนผสมคอนกรีต + ที่แทรกซึมมาจากสิ่งแวดล้อมภายนอก)

$$C_d \leq 0.35 \qquad \text{----------(4)}$$

เนื่องจากโครงสร้างต้องเผชิญกับสัมผัสคลื่นและละอองคลื่น (Splash zone) ดังนั้นจากตารางที่ 10 จะได้

$C_s^{'} = 1.233$ % โดยน้ำหนักของคอนกรีต

จากสมการที่ (5.1-ค) เมื่อออกแบบคอนกรีตให้มีหน่วยน้ำหนักคอนกรีต (ρ_c) 2,400 กก. และมีน้ำหนักวัสดุประสาน (b) 350 กก. ต่อปริมาตรคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร

จะได้ $C_s = 1.233 \times \frac{2,400}{350} = 8.455$ % โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

เนื่องจากใช้น้ำประปา และทรายแม่น้ำในการหล่อคอนกรีต และไม่มีการใช้สารผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ ดังนั้น ไม่มีคลอไรด์ที่ผสมอยู่ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น $C_0 = 0$

จากสมการที่ (5.1-ข) $C_d = (C_s - C_0)\left[1 - erf\left(\frac{c}{2\sqrt{D_a t_r}}\right)\right]$

แทนค่า C_d, C_0 และ c จะได้

$$0.35 = 8.455\left[1 - erf\left(\frac{5.85}{2\sqrt{D_a \times 20}}\right)\right]$$

$$erf\left(\frac{5.85}{2\sqrt{20D_a}}\right)=\left[1-\frac{0.35}{8.455}\right]$$

$$erf\left(\frac{5.85}{2\sqrt{20D_a}}\right)=0.959$$

$$\therefore\left(\frac{5.85}{2\sqrt{20D_a}}\right)=1.445$$

$D_a = 0.2049$ ซม.^{2} ปี$^{-1}$ ----------(5)

จากสมการที่ (5.1-จ) $D_a = D_k + D_0$

จากสมการที่ (5.1-ฉ) $D_0 = 0.05\ W$

จากตารางที่ 7 ในสภาวะเสี่ยงต่อการเกิดสนิมรุนแรง ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวที่มากที่สุดที่ยอมให้ได้ (W) = 0.0035 × 58.5 = 0.2048 มม.

ดังนั้น $D_a = D_k + (0.05 \times 0.2048)$

$\therefore$ $D_a = D_k + 0.0102$ ----------(6)

(5) = (6); $0.2049 = D_k + 0.010$

$\therefore$ $D_k = (0.2049 - 0.0102) = 0.1947$ ซม.^{2} ปี$^{-1}$

จากสมการที่ (5.1-ช), (5.1-ซ), และ (5.1-ฌ) หรือ จากรูปที่ ก-1 และ ก-3 กรณีใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30% และกรณีใช้ปูนซีเมนต์ผสมทั้งเถ้าลอย 30% และผสมผงหินปูนไม่เกิน 15%: เมื่อ t_r = 20 ปี และใช้เถ้าลอย 30%

ถ้า w/b = 0.45 ทำให้ได้ค่า D_k = 0.1588 ซม.^{2} ปี$^{-1}$

ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ (D_k = 0.1947 ซม.^{2} ปี$^{-1}$) หมายความว่าคอนกรีตนี้มีความทนทานผ่านเกณฑ์ที่กำหนดแล้ว แต่มีความเป็นไปได้ว่า อาจสามารถเพิ่ม w/b ขึ้นไปได้อีก ให้ตรวจสอบดังนี้

จากตารางที่ 3 สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน $0.45 < w/b \leq 0.65$ จะได้ ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม (α) เท่ากับ 1.0

จากตารางที่ 5 ซึ่งใช้สำหรับโครงสร้างที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม จะได้ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (c_0) 65 มม. [คอนกรีตหล่อในที่ ทั้งอัดแรงและไม่อัดแรง > องค์อาคารอื่น]

ดังนั้น จากสมการที่ (4.1-ข) และตารางที่ 3 จะได้

ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด $c_{min} \geq \alpha\ c_0$

$c_{min} \geq 1.0 \times 65 = 65$ มม.

จากสมการที่ (4.1-ก) จะได้

ระยะหุ้มเหล็กเสริม $c \geq c_{min}$

$c \geq 65$ มม.

เนื่องจากโครงสร้างต้องเผชิญกับสัมผัสคลื่นและละอองคลื่น (Splash zone) ดังนั้นจากตารางที่ 10 จะได้ $C_s^{'}$ = 1.233 % โดยน้ำหนักของคอนกรีต

จากสมการที่ (5.1-ค) เมื่อออกแบบคอนกรีตให้มีหน่วยน้ำหนักคอนกรีต (ρ_c) 2,400 กก. และมีน้ำหนักวัสดุประสาน (b) 350 กก. ต่อปริมาตรคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร

จะได้ $C_s = 1.233 \times \frac{2,400}{350} = 8.455$ % โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

เนื่องจากใช้น้ำประปา และทรายแม่น้ำในการหล่อคอนกรีต และไม่มีการใช้สารผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ ดังนั้น ไม่มีคลอไรด์ที่ผสมอยู่ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น $C_0 = 0$

จากสมการที่ (5.1-ข) $C_d = \left(C_s - C_0\right)\left[1 - erf\left(\frac{c}{2\sqrt{D_a t_r}}\right)\right]$

แทนค่า C_d, C_0 และ c จะได้

$$0.35 = 8.455\left[1 - erf\left(\frac{6.5}{2\sqrt{D_a \times 20}}\right)\right]$$

$$erf\left(\frac{6.5}{2\sqrt{20D_a}}\right) = \left[1 - \frac{0.35}{8.455}\right]$$

$$erf\left(\frac{6.5}{2\sqrt{20D_a}}\right) = 0.959$$

$$\therefore \left(\frac{6.5}{2\sqrt{20D_a}}\right) = 1.445$$

D_a = 0.2529 ซม.^{2} ปี$^{-1}$ ----------(7)

จากสมการที่ (5.1-จ) $D_a = D_k + D_0$

จากสมการที่ (5.1-ฉ) $D_0 = 0.05\ W$

จากตารางที่ 7 ในสภาวะเสี่ยงต่อการเกิดสนิมรุนแรง ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวที่มากที่สุดที่ยอมให้ได้ (W) = 0.0035 × 65 = 0.2275 มม.

ดังนั้น $D_a = D_k + (0.05 \times 0.2275)$

$\therefore$ $D_a = D_k + 0.0114$ ----------(8)

(7) = (8); $0.2529 = D_k + 0.0114$

$\therefore$ $D_k = (0.2529 - 0.0114) = 0.2415$ ซม.^{2} ปี$^{-1}$

จากสมการที่ (5.1-ช), (5.1-ซ), และ (5.1-ฌ) หรือ จากรูปที่ ก-1 และ ก-3 กรณีใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30% และกรณีใช้ปูนซีเมนต์ผสมทั้งเถ้าลอย 30% และผสมผงหินปูนไม่เกิน 15%: เมื่อ t_r = 20 ปี และใช้เถ้าลอย 30%

ถ้า w/b = 0.51 ทำให้ได้ค่า D_k = 0.2333 ซม.^{2} ปี$^{-1}$ และ

ถ้า w/b = 0.52 ทำให้ได้ค่า D_k = 0.2478 ซม.^{2} ปี$^{-1}$

ดังนั้น w/b ที่มีค่ามากที่สุดที่ทำให้ได้ค่า D_k ไม่เกินเกณฑ์ที่ต้องการ (D_k = 0.2415 ซม.^{2} ปี$^{-1}$) คือ 0.51

<u>สรุป</u>

การออกแบบคอนกรีตให้มีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ สำหรับคานของท่าเทียบเรือ ในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (tidal zone) หรือบริเวณสัมผัสคลื่นและละอองคลื่น (splash zone) โดยกำหนดอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซม (repair-free service life) 20 ปี สามารถใช้คอนกรีตและระยะหุ้มเหล็กเสริมดังต่อไปนี้

อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซม 20 ปี		
โครงสร้างอยู่บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (tidal zone) หรือบริเวณสัมผัสคลื่นและละอองคลื่น (splash zone)		
คอนกรีต		**ระยะหุ้มเหล็กเสริม**
วัสดุประสาน	***w/b***	
1) ปูนซีเมนต์ล้วน	$\leq$ 0.37	$\geq$ 58.5 มม.
2) ปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนไม่เกิน 15%	$\leq$ 0.37	$\geq$ 58.5 มม.
3) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30%	$\leq$ 0.45	$\geq$ 58.5 มม.
4) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30% และผสมผงหินปูนไม่เกิน 15%	$\leq$ 0.45	$\geq$ 58.5 มม.
5) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30%	$\leq$ 0.51	$\geq$ 65 มม.
6) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30% และผสมผงหินปูนไม่เกิน 15%	$\leq$ 0.51	$\geq$ 65 มม.

1) คอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน ที่มีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 58.5 มม. และ w/b ไม่เกิน 0.37
2) คอนกรีตปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนไม่เกิน 15% ที่มีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 58.5 มม. และ w/b ไม่เกิน 0.37
3) คอนกรีตปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30% ที่มีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 58.5 มม. และ w/b ไม่เกิน 0.45
4) คอนกรีตปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30% และผสมผงหินปูนไม่เกิน 15% ที่มีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 58.5 มม. และ w/b ไม่เกิน 0.45
5) คอนกรีตปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30% ที่มีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 65 มม. และ w/b ไม่เกิน 0.51
6) คอนกรีตปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30% และผสมผงหินปูนไม่เกิน 15% ที่มีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 65 มม. และ w/b ไม่เกิน 0.51

นอกจากนี้ ผู้ออกแบบยังสามารถออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่มีสัดส่วนผสมอื่นๆ ได้อีกมากมาย ตามวิธีคำนวณที่แสดงในตัวอย่างนี้

<u>ตัวอย่างที่ 2</u> โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตั้งอยู่บริเวณบรรยากาศทะเล (marine atmospheric zone) บนแผ่นดิน

จงออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับพื้นระเบียงด้านนอกอาคารที่ตั้งอยู่บนแผ่นดินห่างจากแนวชายฝั่งเป็นระยะ 100 เมตร เพื่อใช้ในก่อสร้างอาคารบริเวณชายฝั่งทะเลต่อไปนี้

1) อ่าวไทยตอนบน จากจังหวัดเพชรบุรีถึงจังหวัดตราด

2) ทะเลอันดามัน จากจังหวัดระนองถึงจังหวัดสตูล

3) อ่าวไทยตอนล่าง จากจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ถึงจังหวัดนราธิวาส

กำหนดให้ อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซม (repair-free service life) 30 ปี ไม่มีสิ่งกีดขวางก่อนถึงอาคาร ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตร้อยละ 30 คานอยู่สูงเหนือกระดับน้ำทะเลปานกลาง 1 เมตร

<u>วิธีคำนวณ</u>

จากข้อแนะนำในหัวข้อที่ 4.2 เมื่อพิจารณาโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับพื้นระเบียงด้านนอกอาคารที่ตั้งอยู่บนแผ่นดินห่างจากแนวชายฝั่งเป็นระยะ 100 เมตร แล้วถือว่าอยู่ในสภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมระดับปานกลาง เนื่องจากอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมคลอไรด์ที่อยู่ห่างจากชายฝั่งตั้งแต่ 100 เมตร ถึง 1,000 เมตร ดังนั้น จากตารางที่ 6 กำหนดให้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด ต้องไม่เกิน 0.50

ดังนั้น จากตารางที่ 3 สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน $0.45 \leq w/b < 0.65$ จะได้ ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม (α) เท่ากับ 1.0

จากตารางที่ 5 ซึ่งใช้สำหรับโครงสร้างที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม จะได้ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (c_0) 65 มม. [คอนกรีตหล่อในที่ ทั้งอัดแรงและไม่อัดแรง >> องค์อาคารอื่น]

ดังนั้น จากสมการที่ (4.1-ข) และตารางที่ 3 จะได้

ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด $c_{\min} \geq \alpha\, c_0$

$c_{\min} \geq 1.0 \times 65 = 65$ มม.

จากสมการที่ (4.1-ก) จะได้

ระยะหุ้มเหล็กเสริม $c \geq c_{\min}$

$c \geq 65$ มม.

ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตนี้ กำหนดให้ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานในคอนกรีต ร้อยละ 30

จากตารางที่ 9 จะได้ $C_{\lim} = 0.35$ % โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

จากสมการที่ (5.1-ก) $C_d \leq C_{\lim}$

จะได้ ปริมาณเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่ตำแหน่งผิวเหล็กเสริมทั้งหมด (ที่อยู่ในส่วนผสมคอนกรีต + ที่แทรกซึมมาจากสิ่งแวดล้อมภายนอก)

$$C_d \leq 0.35 \qquad \text{----------(1)}$$

เนื่องจากโครงสร้างตั้งอยู่บนแผ่นดินห่างจากแนวชายฝั่ง 100 เมตร (marine atmospheric zone) ดังนั้น จากตารางที่ 11 สามารถหาค่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (C_s) สำหรับอาคารบริเวณชายฝั่งทะเลต่าง ๆ ของไทย ได้ดังนี้

1. สำหรับบริเวณชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตอนบน จากจังหวัดเพชรบุรีถึงจังหวัดตราด

วิธีที่ 1 คำนวณค่า C_s โดยใช้สมการ

จากสมการที่ (5.1-ง)

$$C_s = \left(0.03\left(\gamma C_a\right)^{0.38}\right)\times\left(10\left(1-e^{-0.1t_r}\right)\right)\times\left(1.7E^{-0.3}\right)\times\left(0.05\left(f/b-0.7\right)^2+0.9\right)\times\left(1.2\log\left(w/b\right)+1.4\right)$$

โดยที่

ก) เนื่องจากไม่มีสิ่งกีดขวาง จากตารางที่ 13 จะได้ค่า γ = 1.0

ข) อัตราการสะสมของคลอไรด์ในอากาศ บริเวณชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตอนบน คำนวณจากสมการในตารางที่ 12

จากสมการ $C_a = 12.79\ e^{-0.00165X}$

เมื่อโครงสร้างห่างจากชายฝั่งทะเล (X) = 100 ม. ดังนั้น C_a = 10.84 mmd

ค) อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซม 30 ปี ดังนั้นค่า t_r = 30 ปี

ง) ความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 1 เมตร ดังนั้นค่า E = 1 ม.

จ) ใช้เถ้าลอย 30% ในส่วนผสมคอนกรีต ดังนั้นค่า f/b = 0.30

ฉ) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุดของคอนกรีต สำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมระดับปานกลาง (อยู่ห่างจากชายฝั่งตั้งแต่ 100 ม. จนถึง 1,000 ม) จากตารางที่ 6 ต้องไม่เกิน 0.50 ดังนั้นค่า w/b = 0.50

จะได้

$$C_s = \left(0.03\left(1.0\times10.84\right)^{0.38}\right)\times\left(10\left(1\text{-}e^{-0.1\times30}\right)\right)\times(1.7\times1^{-0.3})\times\left(0.55\left(0.3\text{-}0.7\right)^2+0.9\right)$$
$$\times\left(1.2\log\left(0.5\right)+1.4\right)$$

= 1.230 % โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

วิธีที่ 2 หาค่า C_s โดยใช้ตาราง

จากตารางที่ ก-4 ในภาคผนวก ก สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 เฉพาะกรณีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางถึงตำแหน่งของชิ้นส่วนโครงสร้าง 1 เมตร และภูมิประเทศไม่มีสิ่งกีดขวาง หากพิจารณาอายุการใช้งาน 30 ปี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 บริเวณอ่าวไทยตอนบน ระยะทางจากแนวชายฝั่งสู่แผ่นดิน 100 เมตร จะได้

C_s = 1.230 % โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

จะเห็นว่ามีค่าเท่ากับค่า C_s ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ (5.1-ง) เหมือนกัน แต่ค่า C_s จากตารางข้างต้นเป็นเฉพาะกรณีความสูง 1 เมตร เหนือระดับน้ำทะเลปานกลางถึงตำแหน่งของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีต และภูมิประเทศไม่มีสิ่งกีดขวางลมทะเลเท่านั้น ซึ่งเป็นกรณีที่มีค่า C_s มากที่สุด หากเป็นกรณีอื่น ๆ ให้หาค่า C_s จากวิธีการคำนวณโดยใช้สมการ (5.1-ง)

เนื่องจากใช้น้ำประปา และทรายแม่น้ำในการหล่อคอนกรีต และไม่มีการใช้สารผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ ดังนั้น ไม่มีคลอไรด์ที่ผสมอยู่ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น $C_0 = 0$

จากสมการที่ (5.1-ข) $$C_d = \left(C_s - C_0\right)\left[1 - erf\left(\frac{c}{2\sqrt{D_a t_r}}\right)\right] + C_0$$

แทนค่า C_d, C_0 และ c จะได้

$$0.35 = 1.23\left[1 - erf\left(\frac{6.5}{2\sqrt{D_a \times 30}}\right)\right]$$

$$erf\left(\frac{6.5}{2\sqrt{30D_a}}\right) = \left[1 - \frac{0.35}{1.230}\right]$$

$$erf\left(\frac{6.5}{2\sqrt{30D_a}}\right) = 0.715$$

$$\therefore \left(\frac{6.5}{2\sqrt{30D_a}}\right) = 0.756$$

D_a= 0.6160 ซม.^{2} ปี$^{-1}$ ----------(2)

จากสมการที่ (5.1-จ) $D_a = D_k + D_0$

จากสมการที่ (5.1-ฉ) $D_0 = 0.05\ W$

จากตารางที่ 7 ในสภาวะเสี่ยงต่อการเกิดสนิมปานกลาง ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวที่มากที่สุดที่ยอมให้ได้ (W) = 0.004 × 65 = 0.26 มม.

ดังนั้น $D_a = D_k + (0.05 \times 0.26)$

$\therefore \quad D_a = D_k + 0.013$ ----------(3)

(2) = (3); $0.6160 = D_k + 0.013$

$\therefore \quad D_k = (0.6160 - 0.013) = 0.6030$ ซม.^{2} ปี$^{-1}$

จากสมการที่ (5.1-ช), (5.1-ซ), และ (5.1-ฌ) หรือ จากรูปที่ ก-1 และ ก-4 กรณีใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30% และกรณีใช้ปูนซีเมนต์ผสมทั้งเถ้าลอย 30% และผสมผงหินปูนไม่เกิน 15%: เมื่อ t_r = 30 ปี และใช้เถ้าลอย 30%

ถ้า w/b = 0.50 ทำให้ได้ค่า D_k = 0.1776 ซม.^{2} ปี$^{-1}$

ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ (D_k = 0.6030 ซม.^{2} ปี$^{-1}$) ค่อนข้างมาก หมายความว่าคอนกรีตนี้มีความทนทานผ่านเกณฑ์ที่กำหนดแล้ว แต่มีความเป็นไปได้ว่า อาจสามารถเพิ่ม w/b ขึ้นไปได้อีก ให้ตรวจสอบดังนี้

ถ้า w/b = 0.60 ทำให้ได้ค่า D_k = 0.3143 ซม.^{2} ปี$^{-1}$

ซึ่งก็มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ (D_k = 0.6030 ซม.^{2} ปี$^{-1}$) ค่อนข้างมากเหมือนเดิม หมายความว่าคอนกรีตนี้มีความทนทานผ่านเกณฑ์ที่กำหนด แต่สมการออกแบบชุดนี้อนุญาตให้ใช้ w/b ได้สูงสุดที่ 0.60 เท่านั้น จึงไม่สามารถเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานขึ้นไปได้มากกว่านี้แล้ว

2. สำหรับบริเวณชายฝั่งทะเลอันดามัน จากจังหวัดระนองถึงจังหวัดสตูล

วิธีที่ 1 คำนวณค่า C_s โดยใช้สมการ

จากสมการที่ (5.1-ง)

$$C_s = \left(0.03\left(\gamma C_a\right)^{0.38}\right) \times \left(10\left(1 - e^{-0.1 t_r}\right)\right) \times \left(1.7E^{-0.3}\right) \times \left(0.55\left(f/b - 0.7\right)^2 + 0.9\right) \times \left(1.2\log\left(w/b\right) + 1.4\right)$$

โดยที่

ก) เนื่องจากไม่มีสิ่งกีดขวาง จากตารางที่ 13 จะได้ค่า γ = 1.0

ข) อัตราการสะสมของคลอไรด์ในอากาศ บริเวณชายฝั่งทะเลอันดามัน คำนวณจากสมการในตารางที่ 12

จากสมการ $C_a = 198.19\ e^{-0.0078X}$

เมื่อโครงสร้างห่างจากชายฝั่งทะเล (X) = 100 ม. ดังนั้น C_a = 90.85 mmd

ค) อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซม 30 ปี ดังนั้นค่า t_r = 30 ปี

ง) ความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 1 เมตร ดังนั้นค่า E = 1 ม.

จ) ใช้เถ้าลอย 30% ในส่วนผสมคอนกรีต ดังนั้นค่า f/b = 0.30

ฉ) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุดของคอนกรีต สำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมระดับปานกลาง (อยู่ห่างจากชายฝั่งตั้งแต่ 100 ม. จนถึง 1,000 ม) จากตารางที่ 6 ต้องไม่เกิน 0.50 ดังนั้นค่า w/b = 0.50

จะได้

$$C_s = \left(0.03\left(1.0\times 90.85\right)^{0.38}\right)\times\left(10\left(1\text{-}e^{-0.1\times 30}\right)\right)\times(1.7\times 1^{-0.3})\times\left(0.55\left(0.3\text{-}0.7\right)^2+0.9\right)$$
$$\times\left(1.2\log\left(0.5\right)+1.4\right)$$

= 2.760 % โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

วิธีที่ 2 หาค่า C_s โดยใช้ตาราง

จากตารางที่ ก-4 ในภาคผนวก ก สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 เฉพาะกรณีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางถึงตำแหน่งของชิ้นส่วนโครงสร้าง 1 เมตร และภูมิประเทศไม่มีสิ่งกีดขวาง หากพิจารณาอายุการใช้งาน 30 ปี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 บริเวณทะเลอันดามัน ระยะทางจากแนวชายฝั่งสู่แผ่นดิน 100 เมตร จะได้

C_s = 2.760 % โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

จะเห็นว่ามีค่าเท่ากับค่า C_s ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ (5.1-ง) เหมือนกัน

เนื่องจากใช้น้ำประปา และทรายแม่น้ำในการหล่อคอนกรีต และไม่มีการใช้สารผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ ดังนั้น ไม่มีคลอไรด์ที่ผสมอยู่ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น $C_0 = 0$

จากสมการที่ (5.1-ข) $\quad C_d = \left(C_s - C_0\right)\left[1 - erf\left(\dfrac{c}{2\sqrt{D_a t_r}}\right)\right] + C_0$

แทนค่า C_d, C_0 และ c จะได้

$$0.35 = 2.760\left[1 - erf\left(\frac{6.5}{2\sqrt{D_a\times 30}}\right)\right]$$

$$erf\left(\frac{6.5}{2\sqrt{30D_a}}\right) = \left[1 - \frac{0.35}{2.760}\right]$$

$$erf\left(\frac{6.5}{2\sqrt{30D_a}}\right) = 0.873$$

$$\therefore \left(\frac{6.5}{2\sqrt{30D_a}}\right) = 1.08$$

D_a= 0.3019 ซม.^{2} ปี$^{-1}$ ----------(4)

จากสมการที่ (5.1-จ) $\quad D_a = D_k + D_0$

จากสมการที่ (5.1-ฉ) $D_0 = 0.05\ W$

จากตารางที่ 7 ในสภาวะเสี่ยงต่อการเกิดสนิมปานกลาง ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวที่มากที่สุดที่ยอมให้ได้ (W) = 0.004 × 65 = 0.26 มม.

ดังนั้น $D_a = D_k + (0.05 \times 0.26)$

$\therefore \quad D_a = D_k + 0.013$ ----------(5)

(4) = (5); $0.3019 = D_k + 0.013$

$\therefore \quad D_k = (0.3019 - 0.013) = 0.2889$ ซม.^{2} ปี$^{-1}$

จากสมการที่ (5.1-ช), (5.1-ซ), และ (5.1-ฌ) หรือ จากรูปที่ ก-1 และ ก-4 กรณีใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30% และกรณีใช้ปูนซีเมนต์ผสมทั้งเถ้าลอย 30% และผสมผงหินปูนไม่เกิน 15%: เมื่อ t_r = 30 ปี และใช้เถ้าลอย 30%

ถ้า w/b = 0.50 ทำให้ได้ค่า D_k = 0.1776 ซม.^{2} ปี$^{-1}$

ซึ่งยังมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ (D_k = 0.2889 ซม.^{2} ปี$^{-1}$) หมายความว่าคอนกรีตนี้มีความทนทานผ่านเกณฑ์ที่กำหนดแล้ว แต่มีความเป็นไปได้ว่า อาจสามารถเพิ่ม w/b ขึ้นไปได้อีก ให้ตรวจสอบดังนี้

ถ้า w/b = 0.58 ทำให้ได้ค่า D_k = 0.2823 ซม.^{2} ปี$^{-1}$ และ

ถ้า w/b = 0.59 ทำให้ได้ค่า D_k = 0.2980 ซม.^{2} ปี$^{-1}$

ดังนั้น w/b ที่มีค่ามากที่สุดที่ทำให้ได้ค่า D_k ไม่เกินเกณฑ์ที่ต้องการ (D_k = 0.2889 ซม.^{2} ปี$^{-1}$) คือ 0.58

3. สำหรับบริเวณชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตอนล่าง จากจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ถึงจังหวัดนราธิวาส

วิธีที่ 1 คำนวณค่า C_s โดยใช้สมการ

จากสมการที่ (5.1-ง)

$$C_s = \left(0.03\left(\gamma C_a\right)^{0.38}\right) \times \left(10\left(1 - e^{-0.1 t_r}\right)\right) \times \left(1.7E^{-0.3}\right) \times \left(0.55\left(f/b - 0.7\right)^2 + 0.9\right) \times \left(1.2\log\left(w/b\right) + 1.4\right)$$

โดยที่

ก) เนื่องจากไม่มีสิ่งกีดขวาง จากตารางที่ 13 จะได้ค่า γ = 1.0

ข) อัตราการสะสมของคลอไรด์ในอากาศ บริเวณชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตอนล่าง คำนวณจากสมการในตารางที่ 12

จากสมการ $C_a = 485.60\ e^{-0.00536X}$

เมื่อโครงสร้างห่างจากชายฝั่งทะเล (X) = 100 ม. ดังนั้น C_a = 284.12 mmd

ค) อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซม 30 ปี ดังนั้นค่า t_r = 30 ปี

ง) ความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 1 เมตร ดังนั้นค่า E = 1 ม.

จ) ใช้เถ้าลอย 30% ในส่วนผสมคอนกรีต ดังนั้นค่า f/b = 0.30

ฉ) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุดของคอนกรีต สำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมระดับปานกลาง (อยู่ห่างจากชายฝั่งตั้งแต่ 100 ม. จนถึง 1,000 ม) จากตารางที่ 6 ต้องไม่เกิน 0.50 ดังนั้นค่า $w/b = 0.50$

จากสมการที่ (5.1-ง) จะได้

$$C_s = \left(0.03\left(1.0\times284.12\right)^{0.38}\right)\times\left(10\left(1\text{-}e^{-0.1\times30}\right)\right)\times(1.7\times1^{-0.3})\times\left(0.55\left(0.3\text{-}0.7\right)^2+0.9\right)$$
$$\times\left(1.2\log\left(0.5\right)+1.4\right)$$

= 4.256 % โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

วิธีที่ 2 หาค่า C_s โดยใช้ตาราง

จากตารางที่ ก-4 ในภาคผนวก ก สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 เฉพาะกรณีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางถึงตำแหน่งของชิ้นส่วนโครงสร้าง 1 เมตร และภูมิประเทศไม่มีสิ่งกีดขวาง หากพิจารณาอายุการใช้งาน 30 ปี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 บริเวณอ่าวไทยตอนล่าง ระยะทางจากแนวชายฝั่งสู่แผ่นดิน 100 เมตร จะได้

C_s = 4.256 % โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

จะเห็นว่ามีค่าเท่ากับค่า C_s ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ (5.1-ง) เหมือนกัน

เนื่องจากใช้น้ำประปา และทรายแม่น้ำในการหล่อคอนกรีต และไม่มีการใช้สารผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์ ดังนั้น ไม่มีคลอไรด์ที่ผสมอยู่ในคอนกรีตตั้งแต่เริ่มต้น $C_0 = 0$

จากสมการที่ (5.1-ข) $$C_d = \left(C_s - C_0\right)\left[1 - erf\left(\frac{c}{2\sqrt{D_a t_r}}\right)\right] + C_0$$

แทนค่า C_d, C_0 และ c จะได้

$$0.35 = 4.256\left[1 - erf\left(\frac{6.5}{2\sqrt{D_a\times30}}\right)\right]$$

$$erf\left(\frac{6.5}{2\sqrt{30D_a}}\right) = \left[1 - \frac{0.35}{4.256}\right]$$

$$erf\left(\frac{6.5}{2\sqrt{30D_a}}\right) = 0.918$$

$$\therefore \left(\frac{6.5}{2\sqrt{30D_a}} \right) = 1.23$$

D_a= 0.2327 ซม.^{2} ปี$^{-1}$ ----------(6)

จากสมการที่ (5.1-จ) $D_a = D_k + D_0$

จากสมการที่ (5.1-ฉ) $D_0 = 0.05\ W$

จากตารางที่ 7 ในสภาวะเสี่ยงต่อการเกิดสนิมปานกลาง ขนาดความกว้างของรอยแตกร้าวที่มากที่สุดที่ยอมให้ได้ (W) = 0.004 × 65 = 0.26 มม.

ดังนั้น $D_a = D_k + (0.05 \times 0.26)$

$\therefore$ $D_a = D_k + 0.013$ ----------(7)

(6) = (7); $0.2327 = D_k + 0.013$

$\therefore$ $D_k = (0.2327 - 0.013) = 0.2197$ ซม.^{2} ปี$^{-1}$

จากสมการที่ (5.1-ช), (5.1-ซ), และ (5.1-ฌ) หรือ จากรูปที่ ก-1 และ ก-4 กรณีใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30% และกรณีใช้ปูนซีเมนต์ผสมทั้งเถ้าลอย 30% และผสมผงหินปูนไม่เกิน 15%: เมื่อ t_r = 30 ปี และใช้เถ้าลอย 30%

ถ้า w/b = 0.50 ทำให้ได้ค่า D_k = 0.1776 ซม.^{2} ปี$^{-1}$

ซึ่งยังมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ (D_k = 0.2197 ซม.^{2} ปี$^{-1}$) หมายความว่าคอนกรีตนี้มีความทนทานผ่านเกณฑ์ที่กำหนดแล้ว แต่มีความเป็นไปได้ว่า อาจสามารถเพิ่ม w/b ขึ้นไปได้อีก ให้ตรวจสอบดังนี้

ถ้า w/b = 0.53 ทำให้ได้ค่า D_k = 0.2128 ซม.^{2} ปี$^{-1}$ และ

ถ้า w/b = 0.54 ทำให้ได้ค่า D_k = 0.2255 ซม.^{2} ปี$^{-1}$

ดังนั้น w/b ที่มีค่ามากที่สุดที่ทำให้ได้ค่า D_k ไม่เกินเกณฑ์ที่ต้องการ (D_k = 0.2197 ซม.^{2} ปี$^{-1}$) คือ 0.53

<u>สรุป</u>

การออกแบบคอนกรีตให้มีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับพื้นระเบียงด้านนอกอาคาร ในบริเวณบรรยากาศทะเล (marine atmospheric zone) บนแผ่นดินห่างจากแนวชายฝั่งเป็นระยะ 100 เมตร ในบริเวณพื้นที่

1) อ่าวไทยตอนบน จากจังหวัดเพชรบุรีถึงจังหวัดตราด

2) ทะเลอันดามัน จากจังหวัดระนองถึงจังหวัดสตูล

3) อ่าวไทยตอนล่าง จากจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ถึงจังหวัดนราธิวาส

โดยกำหนดอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซม (repair-free service life) 30 ปี ไม่มีสิ่งกีดขวางก่อนถึงอาคาร ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตร้อยละ 30 คานอยู่สูงเหนือกระดับน้ำทะเลปานกลาง 1 เมตร สามารถใช้คอนกรีตและระยะหุ้มเหล็กเสริมดังต่อไปนี้

อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซม 30 ปี				
โครงสร้างอยู่ห่างจากแนวชายฝั่งเป็นระยะ 100 เมตร				
ไม่มีสิ่งกีดขวางอาคาร				
โครงสร้างอยู่สูงเหนือกระดับน้ำทะเลปานกลาง 1 เมตร				
คอนกรีต				**ระยะหุ้มเหล็กเสริม**
วัสดุประสาน	***w/b***			
	บริเวณบรรยากาศทะเล (marine atmospheric zone) บนแผ่นดิน			
	อ่าวไทยตอนบน	**ทะเลอันดามัน**	**อ่าวไทยตอนล่าง**	
1) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30%	≤ 0.60	≤ 0.58	≤ 0.53	≥ 65 มม.
2) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30% และผสมผงหินปูนไม่เกิน 15%	≤ 0.60	≤ 0.58	≤ 0.53	≥ 65 มม.

1. สำหรับบริเวณชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตอนบน จากจังหวัดเพชรบุรีถึงจังหวัดตราด
    1) คอนกรีตปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30% ที่มีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 65 มม. และ *w/b* ไม่เกิน 0.60
    2) คอนกรีตปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30% และผสมผงหินปูนไม่เกิน 15% ที่มีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 65 มม. และ *w/b* ไม่เกิน 0.60
2. สำหรับบริเวณชายฝั่งทะเลอันดามัน จากจังหวัดระนองถึงจังหวัดสตูล
    1) คอนกรีตปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30% ที่มีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 65 มม. และ *w/b* ไม่เกิน 0.58
    2) คอนกรีตปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30% และผสมผงหินปูนไม่เกิน 15% ที่มีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 65 มม. และ *w/b* ไม่เกิน 0.58
3. สำหรับบริเวณชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตอนล่าง จากจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ถึงจังหวัดนราธิวาส
    1) คอนกรีตปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30% ที่มีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 65 มม. และ *w/b* ไม่เกิน 0.53
    2) คอนกรีตปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 30% และผสมผงหินปูนไม่เกิน 15% ที่มีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 65 มม. และ *w/b* ไม่เกิน 0.53

นอกจากนี้ ผู้ออกแบบยังสามารถออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่มีสัดส่วนผสมอื่นๆ ได้อีกมากมาย ตามวิธีคำนวณที่แสดงในตัวอย่างนี้

ข2 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น

ตัวอย่าง

จงออกแบบคอนกรีตให้มีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น สำหรับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคารจอดรถ ซึ่งหล่อในที่และเสริมด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. อยู่ในสภาพแวดล้อมซึ่งมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย 600 ppm และมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 70% และไม่ถูกฝน โดยกำหนดอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซม (repair-free service life) 50 ปี

วิธีคำนวณ

จากตารางที่ 6 กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด สำหรับคอนกรีตในสภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมหรือการเสื่อมสภาพของคอนกรีตระดับปานกลาง เช่น สภาพแวดล้อมคาร์บอเนชั่น ต้องไม่เกิน 0.50

ดังนั้น จากตารางที่ 3 สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน $0.45 < w/b \leq 0.65$ จะได้ ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม (α) เท่ากับ 1.0

จากตารางที่ 5 ซึ่งใช้สำหรับโครงสร้างที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม จะได้ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (c_0) 50 มม. [คอนกรีตหล่อในที่ ทั้งอัดแรงและไม่อัดแรง >> แผ่นพื้นและผนัง]

ดังนั้น จากสมการที่ (4.1-ข) และตารางที่ 3 จะได้

ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด $c_{\min} = \alpha \cdot c_0$

$c_{\min} = 1.0 \times 50 = 50$ มม.

จากสมการที่ (4.1-ก) จะได้

ระยะหุ้มเหล็กเสริม $c \geq c_{\min}$

$c \geq 50$ มม.

จากสมการ (5.2-ก) $X_c \leq c$

ดังนั้น ความลึกคาร์บอเนชั่นวัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ

$$X_c \leq c$$

$$X_c \leq 50.0 \qquad \text{----------(1)}$$

จากสมการ (5.2-ข) $X_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \cdot \sqrt{t_r}$

สัมประสิทธิ์การสัมผัสความเปียกชื้น (α_1) จากตารางที่ 14 = 1.0 [สำหรับผิวคอนกรีตที่ไม่สัมผัสความเปียกชื้นขณะใช้งาน]

จากรูปที่ 1 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย 600 ppm และมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 70% จัดอยู่ในระดับสิ่งแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอเนชั่นรุนแรง ดังนั้นสัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชั่น (α_2) จากตารางที่ 15 = 1.0 [เสี่ยงต่อคาร์บอเนชั่นรุนแรง]

$$X_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \cdot \sqrt{t_r}$$

$$50 = 1 \cdot 1 \cdot k \cdot \sqrt{50}$$

$$k = 7.071 \quad \text{มม. ปี}^{-0.5} \qquad \text{-------(2)}$$

<u>กรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน</u>

จากสมการ (5.2-ค) $k = 17.5 \cdot k_r \cdot (w/b)^3$

จากรูปที่ 2 เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว หรือร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยมีค่าเป็น 0 % $k_r = 1.0$

ดังนั้น $k = 17.5 \times 1.0 \times (w/b)^3$

$w/b = 0.65$ จะได้ค่า $k = 4.806$ มม. ปี$^{-0.5}$

และยังเป็นอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุดที่สามารถใช้ได้ในสมการชุดนี้อีกด้วย

ดังนั้น $w/b = 0.65$ จึงเป็นอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากสุดที่ไม่เกินเกณฑ์

$$k = 7.071 \text{ มม. ปี}^{-0.5}$$

w/b ที่คำนวณได้นี้ อยู่ในช่วงที่สมมุติค่าจากตารางที่ 3 คือ [w/b ระหว่าง 0.45-0.65] จึงไม่จำเป็นต้องคำนวณใหม่

<u>กรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย (ประเภท 2ก) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน</u>

จากรูปที่ 2 เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 กับเถ้าลอยประเภท 2ก โดยร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยมีค่าเป็น 20% $k_r = 1.5$

ดังนั้น $k = 17.5 \times 1.5 \times (w/b)^3$

$w/b = 0.65$ จะได้ค่า $k = 7.209$ มม. ปี$^{-0.5}$

$w/b = 0.64$ จะได้ค่า $k = 6.881$ มม. ปี$^{-0.5}$

ดังนั้น $w/b = 0.64$ จึงเป็นอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากสุดที่ไม่เกินเกณฑ์ $k = 7.071$ มม. ปี$^{-0.5}$

w/b ที่คำนวณได้นี้ อยู่ในช่วงที่สมมุติค่าจากตารางที่ 3 คือ [w/b ระหว่าง 0.45-0.65] จึงไม่จำเป็นต้องคำนวณใหม่

<u>กรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย (ประเภท 2ก) ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน</u>

จากรูปที่ 2 เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 กับเถ้าลอยประเภท 2ก โดยร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยมีค่าเป็น 30% $k_r = 1.9$

ดังนั้น $k = 17.5 \times 1.9 \times (w/b)^3$

$w/b = 0.60$ จะได้ค่า k = 7.182 มม. ปี$^{-0.5}$

$w/b = 0.59$ จะได้ค่า k = 6.829 มม. ปี$^{-0.5}$

ดังนั้น $w/b = 0.59$ จึงเป็นอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากสุดที่ไม่เกินเกณฑ์ $k = 7.071$ มม. ปี$^{-0.5}$

w/b ที่คำนวณได้นี้ อยู่ในช่วงที่สมมุติค่าจากตารางที่ 3 คือ [*w/b* ระหว่าง 0.45-0.65] จึงไม่จำเป็นต้องคำนวณใหม่

<u>สรุป</u> การออกแบบคอนกรีตให้มีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น สำหรับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคารจอดรถ ซึ่งหล่อในที่และเสริมด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. อยู่ในสภาพแวดล้อมซึ่งมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย 600 ppm และมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 70% และไม่ถูกฝน โดยกำหนดอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซม (repair-free service life) 50 ปี สามารถใช้คอนกรีตดังต่อไปนี้

1) คอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน ระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 50 มม. โดยที่ w/b ไม่เกิน 0.65
2) คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย (ประเภท 2ก) สัดส่วนการแทนที่ 20% ระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 50 มม. โดยที่ w/b ไม่เกิน 0.64
3) คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย (ประเภท 2ก) สัดส่วนการแทนที่ 30% ระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 50 มม. โดยที่ w/b ไม่เกิน 0.59

นอกจากนี้ผู้ออกแบบยังสามารถออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย ทั้งประเภท 2ก และประเภท 2ข ที่มีสัดส่วนผสมอื่น ๆ ได้อีกมากมาย ตามวิธีคำนวณที่แสดงในตัวอย่างนี้

ข3 การคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะภายนอกของหินที่นำมาผสมคอนกรีต

หินที่นำมาใช้ในการผสมคอนกรีต มักเป็นหินย่อย (crushed rock) จึงมีรูปร่างไม่แน่นอน มีเหลี่ยมมุม และคละขนาด การคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะภายนอกของหินที่นำมาผสมคอนกรีต สามารถคำนวณได้ดังสมการ (ข3-ก) ถึงสมการ (ข3-ค)

$$S_R = \psi \cdot S_o \qquad \text{(ข3-ก)}$$

$$S_0 = \frac{6000}{D_{av} \cdot \rho} \qquad \text{(ข3-ข)}$$

$$D_{av} = \frac{\sum D_i M_i}{\sum M_i} \qquad \text{(ข3-ค)}$$

โดยที่ S_R คือ พื้นที่ผิวจำเพาะภายนอกของหินผสมคอนกรีต (ตร.ซม./กก.)

S_o คือ พื้นที่ผิวจำเพาะภายนอกของหินรูปทรงกลม (ตร.ซม./กก.)

ψ คือ สัมประสิทธิ์ความเป็นเหลี่ยมมุม (หินย่อยใช้ค่า ψ =1.4)

D_{av} คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของหินทรงกลม (ซม.)

ρ คือ ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม

D_i คือ ค่าเฉลี่ยความกว้างของช่องเปิดตะแกรงด้านบนและตะแกรง i ที่หินค้าง (ซม.)

M_i คือ ร้อยละของหินค้างบนตะแกรง i

ตัวอย่างการคำนวณ พื้นที่ผิวจำเพาะภายนอกของหิน จากผลทดสอบการวิเคราะห์ขนาดของหิน (sieve analysis) กรณีหินมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.67 ดังตารางที่ ข3-1

ตารางที่ ข3-1 การคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะภายนอกของหิน

ขนาดตะแกรง	**ขนาดช่องเปิด (ซม.)**	**ค่าเฉลี่ยขนาดช่องเปิด,** คือ สัมประสิทธิ์ D_i **(ซม.)**	**ร้อยละที่ค้างบนตะแกรง,** M_i	$D_i M_i$
1 1/2”	3.75	0	0	0
1”	2.50	3.155	0	0
3/4”	1.90	2.20	5.00	11.00
1/2”	1.25	1.575	57.50	90.56
3/8”	0.95	1.10	30.00	33.00
No.4	0.475	0.712	7.50	5.34
ถาด	0	0	0	0
$\sum$			100	139.91
$D_{av} = \sum D_i M_i / \sum M_i$ = 139.91 / 100 = 1.399 ซม.				
$S_0 = 6000 / D_{av} \cdot \rho$ = 6000/(1.399x2.67)) = 1606 ตร.ซม./กก.				
S_R =1.4 S_0 = 1.4(1606) = 2249 ตร.ซม./กก.				

ข4 การคำนวณการหดตัวรวมของคอนกรีต

<u>ตัวอย่างที่ 1 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1</u>

จงคำนวณหาค่าการหดตัวรวมของพื้นคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และเริ่มเผชิญกับสภาวะแห้งที่มีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 50% หลังจากการบ่มน้ำ 7 วัน โดยพื้นคอนกรีตมีอัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวซึ่งสัมผัสอากาศของโครงสร้างคอนกรีต (V/S) = 16.57 มม. โดยปัจจัยสำคัญของคอนกรีตสำหรับใช้เป็นส่วนประกอบการคำนวณทำนายค่าการหดตัวของคอนกรีต มีรายละเอียดดังตารางที่ ข4-1

ตารางที่ ข4-1 ปัจจัยสำหรับคำนวณการหดตัวของคอนกรีต

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน, (w/b)	0.55
อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (°C) , T	28
อายุของคอนกรีตที่เริ่มสัมผัสกับอากาศหลังจากการบ่มชื้น (วัน), t_0	7
อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย, r_{FA}	0
ปริมาณร้อยละของ SO_3 ในเถ้าลอย (%), $\%SO_{3f}$	0
อัตราส่วนการแทนที่ด้วยผงหินปูน, r_{LP}	0
อัตราส่วนของมวลรวมโดยปริมาตรในส่วนผสม, n	0.676
ร้อยละการดูดซึมน้ำของหิน $=\varphi_R$	0.37
$\varepsilon_R = -52 + 699\varphi_R - 86\varphi^2$	195
ผลรวมพื้นที่ผิวจำเพาะภายนอกของหินที่นำมาผสมคอนกรีต (cm^2/kg), S_R	2249
ความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม (%), RH	50
α	0.014
ψ	0.912
กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน *(MPa)*, $f_c^{'}$	32.6
อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวซึ่งสัมผัสอากาศ (มม.), V/S	16.57

ขั้นตอนการคำนวณค่าการหดตัวออโตจีนัสของคอนกรีต

จากสมการ (6.2-ค) $\varepsilon_{as}(t)=\varepsilon_{asm}\times\beta(t)$ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับค่าการหดตัว ดังตารางที่ ข4-2

ตารางที่ ข4-2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับค่าการหดตัวออโตจีนัส

$\varepsilon_{asm}=258\left(-ln\ (w/b)\right)\times\gamma_T\times\gamma_{FA}\times\gamma_{LP}\times\gamma_n\times\gamma_{\varphi R}\times\gamma_{SR}\ :\beta(t)=\ 1-exp\ (-\eta\cdot t^{\lambda})$		
ลำดับ	**สมการคำนวณ**	**ผลคำนวณ**
1	$258\left(-ln\ (w/b)\right)$	154
2	$\gamma_T=0.61T^{0.15}$ จากสมการ (6.2-จ)	1.006
3	$\gamma_{FA}=\chi\cdot exp\ \left(\left(1/\left(-1.13+0.49\left(w/b\right)^{3.10}\right)\right)r_{FA}\right)$ จากสมการ (6.2-ฉ)	1
4	$\chi=1$ (สำหรับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย) $\chi=1+0.46exp\left(-3.55\left(\%SO_{3f}\right)\right)$ (สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย) จากสมการ (6.2-ช)	1
5	$\gamma_{LP}=1/\left(1+1.08\left(r_{LP}\right)^{1.23}\right)$ จากสมการ (6.2-ซ)	1
6	$\gamma_n=165\ \left(0.00053\right)^n$ จากสมการ (6.2-ฌ)	1.007
7	$\gamma_{\varphi R}=1.286/(1+exp\ (3.972-0.0054\varepsilon_R))^{(1/13)}$ จากสมการ (6.2-ญ)	1.023
8	$\gamma_{SR}=\ 1.338\exp\left(-340/\left(0.58S_R\right)\right)$ จากสมการ (6.2-ฎ)	1.025
9	$\eta=\ 0.04\left(w/b\right)^{-1.62}$	0.105
10	$\lambda=0.22\left(8.96\right)^{(w/b)}$	0.735
11	$\varepsilon_{asm}=258\left(-ln\left(w/b\right)\right)\times\gamma_T\times\gamma_{FA}\times\gamma_{LP}\times\gamma_n\times\gamma_{\varphi R}\times\gamma_{SR}$	164
12	$\beta(t)=1-exp\ (-\eta\cdot t^{\lambda})$	$1-\exp(-0.105\cdot t^{0.735})$

แทนเวลา t เพื่อคำนวณค่าการหดตัวออโตจีนัส ($\times 10^{-6}$) ที่อายุที่พิจารณา t ได้ดังตารางที่ ข4-3

ตารางที่ ข4-3 ค่าการหดตัวออโตจีนัส ($\times 10^{-6}$)

เวลา (วัน)	$\varepsilon_{as}(t)\ =\varepsilon_{asm}\cdot\beta(t)=\left(164\right)(1-\exp(-0.105\times t^{0.735}))$
0	0
7	58
14	85
28	115
60	144
90	155
180	162
240	163

ขั้นตอนการคำนวณค่าการหดตัวแห้งของคอนกรีต

จากสมการ (6.3-ก) $\varepsilon_{ds}(t,\ t_o)=\varepsilon_{dsm}\times\beta(t,\ t_o)$ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับค่าการหดตัว ดังตารางที่ ข4-4

ตารางที่ ข4-4 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับค่าการหดตัวแห้ง

$$\varepsilon_{dsm}=\left[\left(24.57+717(w/b)^{6.93}\right)/\left(0.054+(w/b)^{6.93}\right)\right]\times K_T\times K_{RH}\times K_{FA}\times K_{LP}\times K_{CU}\times K_n\times K_{\varphi R}\times K_{SR}$$

$$:\beta(t,t_o)=\left((t-t_o)\cdot B\right)/\left((t-t_o)+A\cdot G\cdot N\cdot F\right)$$

ลำดับ	สมการคำนวณ	ผลคำนวณ
1	$\left[\left(24.57+717(w/b)^{6.93}\right)/\left(0.054+(w/b)^{6.93}\right)\right]$	515
2	$K_T=0.88\left(1.049^T\right)\left(T^{-0.36}\right)$ จากสมการ (6.3-ค)	1.012
3	$K_{RH}=1.143\left(1-(RH/100)^3\right)$ จากสมการ (6.3-ง)	1
4	$K_{FA}=\delta\cdot((1+\ 0.07r_{FA})^{(1/0.20)})$ จากสมการ (6.3-จ)	1
5	$\delta=1$ (สำหรับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย) $\delta=1+0.17\exp\left(-3.07\left(\%SO_{3f}\right)\right)$ (สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย) จากสมการ (6.3-ฉ)	1
6	$K_{LP}=\ 1/\ \left(1+1.08\left(r_{LP}\right)^{1.23}\right)$ จากสมการ (6.3-ช)	1
7	$K_{CU}=\ (1/(0.917+\alpha\cdot(t_o)^{\psi})$ จากสมการ (6.3-ซ)	1
8	$K_n=6.644(0.061)^n$ จากสมการ (6.3-ฌ)	1.003
9	$K_{\varphi R}=1.422/(1+\exp(10.676-0.018\varepsilon_R))^{(1/21.287)}$ จากสมการ (6.3-ญ)	1.015
10	$K_{SR}=1.412\exp\left(-422/\left(0.58S_R\right)\right)$ จากสมการ (6.3-ฏ)	1.023
11	$B=9.21^{(1/f_c')}$ จากสมการ (6.3-ฑ)	1.070
12	$A=10\exp\left(16/f_c'\right)$ จากสมการ (6.3-ฒ)	16.336
13	$G=0.24\left(V/S\right)^{0.51}$ จากสมการ (6.3-ณ)	1.005
14	$N=2.58\exp\left(-1.44n\right)$ จากสมการ (6.3-ด)	0.975
15	$F=1$ (สำหรับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย) $F=(0.93r_{FA}{}^{0.94})^{r_{FA}}$ จากสมการ (6.3-ต)	1.000
16	$\varepsilon_{dsm}=\left[\left(24.57+717(w/b)^{6.93}\right)/\left(0.054+(w/b)^{6.93}\right)\right]\times K_T\times K_{RH}\times K_{FA}$ $\times K_{LP}\times K_{CU}\times K_n\times K_{\varphi R}\times K_{SR}$	543
17	$\beta(t,\ t_o)\ =\ \left((t-t_o)\times B\right)/\left((t-t_o)\ +\ A\cdot G\cdot N\cdot F\right)$	$\dfrac{\left((t-t_o)\cdot 1.070\right)}{\left((t-t_o)+15.998\right)}$

แทนเวลา (t,t_0) เพื่อคำนวณค่าการหดตัวแห้ง ($\times 10^{-6}$) ที่อายุที่พิจารณา t ได้ดังตารางที่ ข4-5

ตารางที่ ข4-5 ค่าการหดตัวแห้ง ($x10^{-6}$)

เวลา (วัน)	$\varepsilon_{ds}(t,\ t_o)=\varepsilon_{dsm}\cdot\beta(t,t_o)=(543)\left((t,t_o)\times 1.070)/\left((t,t_o)\ +15.998\right)\right)$
0	0
7	0
14	177
28	330
60	446
90	487
180	532
240	544

ขั้นตอนการคำนวณค่าการหดตัวรวมของคอนกรีต

จากสมการ (6.1-ก) $\varepsilon_{TS}(t,t_o)\ =\varepsilon_{as}(t,t_o)\ +\varepsilon_{ds}(t,t_o)$

เมื่อ $\varepsilon_{as}(t,t_o)\ =\varepsilon_{as}(t)-\varepsilon_{as}(t_o)$

แทนค่า $\varepsilon_{as}(t,t_o)$ ในสมการ (6.1-ก) $\varepsilon_{TS}(t,t_o)\ =\varepsilon_{as}(t)-\varepsilon_{as}(t_o)+\varepsilon_{ds}(t,t_o)$

คำนวณค่าการหดตัวรวมของคอนกรีตได้ดังตารางที่ ข4-6

ตารางที่ ข4-6 การคำนวณค่าการหดตัวรวม ($x10^{-6}$)

อายุคอนกรีต (วัน)	$\varepsilon_{as}(t)$	$\varepsilon_{as}(t_o)$	$\varepsilon_{ds}(t,t_o)$	$\varepsilon_{TS}(t,t_o)$
0	0	0	0	0
7	58	58	0	0
14	85	58	177	204
28	115	58	330	387
60	144	58	446	533
90	155	58	487	584
180	162	58	532	636
240	163	58	544	649

<u>ตัวอย่างที่ 2 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ผสมเถ้าลอย</u>

จงคำนวณหาค่าการหดตัวรวมของพื้นคอนกรีตที่ใช้คอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และเริ่มเผชิญกับสภาวะแห้งที่มีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 50% หลังจากการบ่มน้ำ 7 วัน โดยพื้นคอนกรีตมีอัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวซึ่งสัมผัสอากาศของโครงสร้างคอนกรีต (V/S) = 16.57 มม. โดยปัจจัยสำคัญของคอนกรีตสำหรับใช้เป็นส่วนประกอบการคำนวณทำนายค่าการหดตัวของคอนกรีต มีรายละเอียด ดังตารางที่ ข4-7

ตารางที่ ข4-7 ปัจจัยสำหรับคำนวณการหดตัวของคอนกรีต

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน, (w/b)	0.55
อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (°C) , T	28
อายุของคอนกรีตที่เริ่มสัมผัสกับอากาศหลังจากการบ่มชื้น (วัน), t_0	7
อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย, r_{FA}	0.30
ปริมาณร้อยละของ SO_3 ในเถ้าลอย (%), $\%SO_{3f}$	3.03
อัตราส่วนการแทนที่ด้วยผงหินปูน, r_{LP}	0
อัตราส่วนของมวลรวมโดยปริมาตรในส่วนผสม, n	0.676
ร้อยละการดูดซึมน้ำของหิน $= \varphi_R$	0.37
$\varepsilon_R = -52 + 699\varphi_R - 86\varphi_R^2$	195
ผลรวมพื้นที่ผิวจำเพาะภายนอกของหินที่นำมาผสมคอนกรีต (cm^2/kg), S_R	2249
ความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม (%), RH	50
α	0.014
ψ	0.912
กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน *(MPa)*, $f_c^{'}$	23.2
อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิวซึ่งสัมผัสอากาศ (มม.), V/S	16.57

ขั้นตอนการคำนวณค่าการหดตัวออโตจีนัสของคอนกรีต

จากสมการ (6.2-ค) $\varepsilon_{as}(t) = \varepsilon_{asm} \times \beta(t)$ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับค่าการหดตัว ดังตารางที่ ข4-8

ตารางที่ ข4-8 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับค่าการหดตัวออโตจีนัส

$\varepsilon_{asm}=258\left(-ln\left(w/b\right)\right)\times\gamma_T\times\gamma_{FA}\times\gamma_{LP}\times\gamma_n\times\gamma_{jR}\times\gamma_{SR}:\beta\left(t\right)=1-exp\ (-\eta\cdot t^{\lambda})$		
ลำดับ	**สมการคำนวณ**	**ผลคำนวณ**
1	$258\left(-ln\left(w/b\right)\right)$	154
2	$\gamma_T=0.61T^{0.15}$ จากสมการ (6.2-จ)	1.006
3	$\gamma_{FA}=\chi\cdot\exp\left(\left(1/\left(-1.13+0.49\left(w/b\right)^{3.10}\right)\right)r_{FA}\right)$ จากสมการ (6.2-ฉ)	0.752
4	$\chi=1$ (สำหรับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย) $\chi=1+0.46\exp\left(-3.55\left(\%SO_{3f}\right)\right)$ (สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย) จากสมการ (6.2-ช)	1.00
5	$\gamma_{LP}=1/\left(1+1.08\left(r_{LP}\right)^{1.23}\right)$ จากสมการ (6.2-ซ)	1
6	$\gamma_n=165\ \left(0.00053\right)^n$ จากสมการ (6.2-ฌ)	1.007
7	$\gamma_{\varphi R}=1.286/(1+\exp(3.972-0.0054\varepsilon_R))^{(1/13)}$ จากสมการ (6.2-ญ)	1.023
8	$\gamma_{SR}=1.338\exp\left(-340/\left(0.58S_R\right)\right)$ จากสมการ (6.2-ฏ)	1.025
9	$\eta=0.04\left(w/b\right)^{-1.62}$	0.105
10	$\lambda=0.22\left(8.96\right)^{(w/b)}$	0.735
11	$\varepsilon_{asm}=258\left(-ln\left(w/b\right)\right)\times\gamma_T\times\gamma_{FA}\times\gamma_{LP}\times\gamma_n\times\gamma_{jR}\times\gamma_{SR}$	123
12	$\beta\left(t\right)=1-\exp(-\eta\times t^{\lambda})$	$1-\exp(-0.105\cdot t^{0.735})$

แทนเวลา t เพื่อคำนวณค่าการหดตัวออโตจีนัส ($\times 10^{-6}$) ที่อายุที่พิจารณา t ได้ดังตารางที่ ข4-9

ตารางที่ ข4-9 ค่าการหดตัวออโตจีนัส ($\times 10^{-6}$)

เวลา (วัน)	$\varepsilon_{as}\left(t\right)=\varepsilon_{asm}\cdot\beta\left(t\right)=\left(123\right)(1-\exp(-0.105\cdot t^{0.735}))$
0	0
7	44
14	64
28	87
60	109
90	116
180	122
240	123

ขั้นตอนการคำนวณค่าการหดตัวแห้งของคอนกรีต

จากสมการ (6.3-ก) $\varepsilon_{ds}\left(t,t_o\right)=\varepsilon_{dsm}\times\beta\left(t,t_o\right)$ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับค่าการหดตัว ดังตารางที่ ข4-10

ตารางที่ ข4-10 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับค่าการหดตัวแห้ง

$\varepsilon_{dsm}=\left[\left(24.57+717\left(w/b\right)^{6.93}\right)/\left(0.054+\left(w/b\right)^{6.93}\right)\right]\times K_T\times K_{RH}\times K_{FA}\times K_{LP}\times K_{CU}\times K_n\times K_{\varphi R}\times K_{SR}$

$:\beta\left(t,t_o\right)=\left(\left(t-t_o\right)\cdot B\right)/\left(\left(t-t_o\right)+A\cdot G\cdot N\cdot F\right)$

ลำดับ	สมการคำนวณ	ผลคำนวณ
1	$\left[\left(24.57+717\left(w/b\right)^{6.93}\right)/\left(0.054+\left(w/b\right)^{6.93}\right)\right]$	515
2	$K_T=0.88\left(1.049^T\right)\left(T^{-0.36}\right)$ จากสมการ (6.3-ค)	1.012
3	$K_{RH}=1.143\left(1-\left(RH/100\right)^3\right)$ จากสมการ (6.3-ง)	1.000
4	$K_{FA}=\delta\cdot((1+\ 0.07r_{FA})^{(1/0.20)})$ จากสมการ (6.3-จ)	0.901
5	$\delta=1$ (สำหรับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย) $\delta=1+0.17\exp\left(-3.07\left(\%SO_{3f}\right)\right)$ (สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย) จากสมการ (6.3-ฉ)	1.000
6	$K_{LP}=1/\left(1+1.08\left(r_{LP}\right)^{1.23}\right)$ จากสมการ (6.3-ช)	1.000
7	$K_{CU}=(1/(0.917+\alpha\cdot(t_o)^{\psi})$ จากสมการ (6.3-ซ)	1.000
8	$K_n=6.644\left(0.061\right)^n$ จากสมการ (6.3-ฌ)	1.003
9	$K_{\varphi R}=1.422/(1+\exp(10.676-0.018\varepsilon_R))^{(1/21.287)}$ จากสมการ (6.3-ญ)	1.015
10	$K_{SR}=1.412\exp\left(-422/\left(0.58S_R\right)\right)$ จากสมการ (6.3-ฏ)	1.023
11	$B\ =\ 9.21^{(1/f_c^{'})}$ จากสมการ (6.3-ฑ)	1.100
12	$A=10\exp\left(16/f_c^{'}\right)$ จากสมการ (6.3-ฒ)	19.930
13	$G=0.24\left(V/S\right)^{0.51}$ จากสมการ (6.3-ณ)	1.005
14	$N=2.58\exp\left(-1.44n\right)$ จากสมการ (6.3-ด)	0.975
15	$F=1$ (สำหรับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย) $F=(0.93r_{FA}{}^{0.94})^{r_{FA}}$ จากสมการ (6.3-ต)	0.697
16	$\varepsilon_{dsm}=\left[\left(24.57+717\left(w/b\right)^{6.93}\right)/\left(0.054+\left(w/b\right)^{6.93}\right)\right]\times K_T\times K_{RH}\times K_{FA}$ $\times K_{LP}\times K_{CU}\times K_n\times K_{\varphi R}\times K_{SR}$	489
17	$\beta\left(t,t_o\right)=\left(\left(t-t_o\right)\cdot B\right)/\left(\left(t-t_o\right)+A\cdot G\cdot N\cdot F\right)$	$\frac{\left(\left(t-t_o\right)\times1.100\right)}{\left(\left(t-t_o\right)\ +13.600\right)}$

แทนเวลา (t,t_0) เพื่อคำนวณค่าการหดตัวแห้ง ($\times 10^{-6}$) ที่อายุที่พิจารณา t ได้ดังตารางที่ ข4-11

ตารางที่ ข4-11 ค่าการหดตัวแห้ง ($\times 10^{-6}$)

เวลา (วัน)	$\varepsilon_{ds}(t,t_o)=\varepsilon_{dsm}\cdot\beta(t,t_o)=(489)\left(((t-t_o)\cdot 1.100)/((t-t_o)+13.600)\right)$
0	0
7	0
14	183
28	327
60	429
90	463
180	499
240	509

ขั้นตอนการคำนวณค่าการหดตัวรวมของคอนกรีต

จากสมการ (6.1-ก) $\varepsilon_{TS}(t,t_o) = \varepsilon_{as}(t,t_o)+\varepsilon_{ds}(t,t_o)$

เมื่อ $\varepsilon_{as}(t,t_o) = \varepsilon_{as}(t)-\varepsilon_{as}(t_o)$

แทนค่า $\varepsilon_{as}(t,t_o)$ ในสมการ (6.1-ก) $\varepsilon_{TS}(t,t_o)=\varepsilon_{as}(t)-\varepsilon_{as}(t_o)+\varepsilon_{ds}(t,t_o)$

คำนวณค่าการหดตัวรวมของคอนกรีตได้ดังตารางที่ ข4-12

ตารางที่ ข4-12 การคำนวณค่าการหดตัวรวม ($x10^{-6}$)

อายุคอนกรีต (วัน)	$\varepsilon_{as}(t)$	$\varepsilon_{as}(t_o)$	$\varepsilon_{ds}(t,t_o)$	$\varepsilon_{TS}(t,t_o)$
0	0	0	0	0
7	44	44	0	0
14	64	44	183	203
28	87	44	327	370
60	109	44	429	493
90	116	44	463	535
180	122	44	499	578
240	123	44	509	588

ข5 การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต

<u>ตัวอย่าง</u>

จงออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีความคงทนต่อการกัดกร่อนของคอนกรีตเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต สำหรับหล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับดินตลอดเวลาที่ใช้งาน และใช้ดินเป็นแบบ โดยตรวจสอบพบว่าปริมาณซัลเฟตที่ละลายน้ำได้ในดินมีค่า 3% โดยน้ำหนักของดิน

<u>วิธีคำนวณ</u>

จากตารางที่ 17 ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมโซเดียมซัลเฟตดังกล่าว (ปริมาณซัลเฟตที่ละลายน้ำได้ในดินมีค่า 3% โดยน้ำหนักของดิน) จัดได้ว่า "เสี่ยงต่อซัลเฟตรุนแรง"

จากตารางที่ 18 ด้วยระดับความรุนแรง "เสี่ยงต่อซัลเฟตรุนแรง" แนะนำให้ใช้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 หรือ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ผสมกับปอซโซลาน โดยมี w/b ไม่เกิน 0.45

ดังนั้นจากตารางที่ 3 สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน $w/b < 0.45$ จะได้ ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม (α) เท่ากับ 0.9

จากตารางที่ 4 ระยะหุ้มเหล็กเสริมต่ำสุด 75 มม. [คอนกรีตที่หล่อติดกับดินโดยใช้ดินเป็นแบบ และผิวคอนกรีตสัมผัสกับดินตลอดเวลาที่ใช้งาน]

ดังนั้น จากสมการที่ (4.1-ข) และตารางที่ 3 จะได้

ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด $c_{\min} = \alpha \cdot c_0$

$c_{\min} = 0.9 \times 75 = 67.5$ มม.

จากสมการที่ (4.1-ก) จะได้

ระยะหุ้มเหล็กเสริม $c \geq c_{\min}$

$c \geq 67.5$ มม.

กรณีใช้เถ้าลอยเป็นสารปอซโซลาน โดยที่เถ้าลอยที่นำมาใช้มีปริมาณ CaO 13% โดยน้ำหนักของเถ้าลอย จากรูปที่ 3 ปริมาณเถ้าลอยที่ควรใช้ จะอยู่ที่ 34% โดยน้ำหนักของวัสดุประสานทั้งหมด เพื่อให้คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ผสมเถ้าลอยนี้ มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตเทียบเท่ากับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 ล้วน

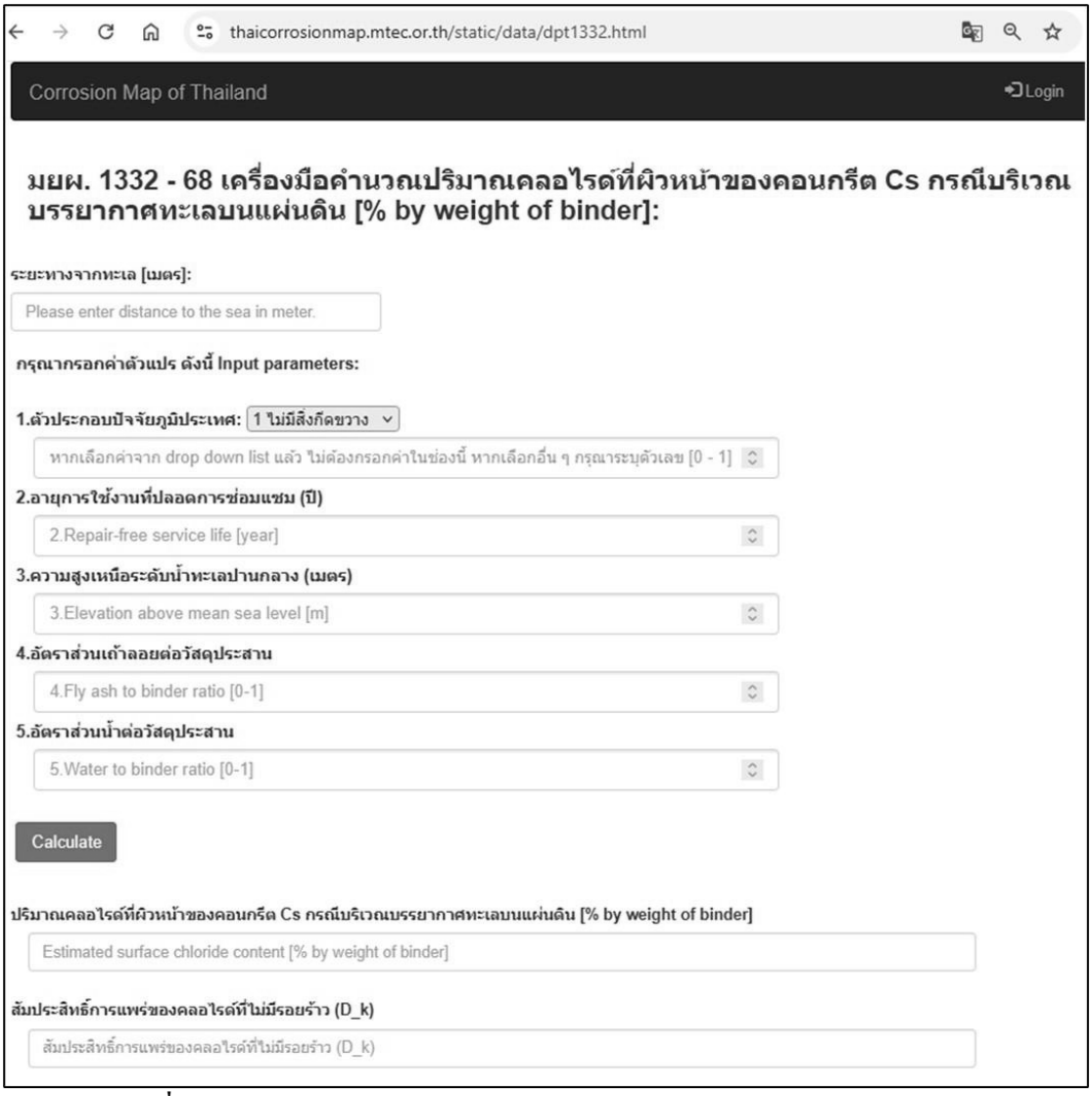
<u>สรุป</u> สำหรับหล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับดินตลอดเวลาที่ใช้งาน โดยตรวจสอบพบว่า ปริมาณซัลเฟตที่ละลายน้ำได้ในดินมีค่า 3% โดยน้ำหนักของดิน จำเป็นต้องใช้คอนกรีตดังนี้

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่มีระยะหุ้มไม่น้อยกว่า 67.5 มม. และ w/b ไม่เกิน 0.45
2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ผสมเถ้าลอยที่มี CaO 13% สัดส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานไม่น้อยกว่า 34% ที่มีระยะหุ้มไม่น้อยกว่า 67.5 มม. และ w/b ไม่เกิน 0.45

ภาคผนวก ค การหาค่าจากเว็บแอพพลิเคชั่นผ่านเว็บไซต์

ขั้นตอนการหาค่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (C_s) จากเว็บแอพพลิเคชั่นผ่านเว็บไซต์

1. เว็บไซต์ https://thaicorrosionmap.mtec.or.th/static/data/dpt1332.html เป็นการคำนวณปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (C_s) ตามสมการ 5.1-ง ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ โดยมีรายละเอียดตามรูปที่ ค-1



รูปที่ ค-1 เว็บไซต์ https://thaicorrosionmap.mtec.or.th/static/data/dpt1332.html

2. กรอกค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อคำนวณหาค่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต และสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ไม่มีรอยร้าว (D_k) ประกอบด้วย

2.1 ระยะทางจากทะเล หน่วยเป็นเมตร แต่ไม่เกิน 1,000 เมตร

2.2 บริเวณชายฝั่ง ได้แก่ อ่าวไทยตอนบน อ่าวไทยตอนล่าง และทะเลอันดามัน

2.3 ตัวประกอบปัจจัยภูมิประเทศ ตามตารางที่ 13 ได้แก่ ไม่มีสิ่งกีดขวาง รั้วเตี้ย ต้นไม้ อาคาร 3 ชั้น ภูเขา และอื่น ๆ กรณีเลือกปัจจัยภูมิประเทศอื่น ๆ จะต้องกรอกค่าตัวประกอบปัจจัยภูมิประเทศที่มีความใกล้เคียงกับลักษณะภูมิประเทศข้างต้น โดยมีค่าตั้งแต่ 0.1 – 1.0

2.4 อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซม (repair-free service life) กำหนดโดยเจ้าของอาคาร หน่วยเป็นปี

2.5 ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง คือ ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางถึงตำแหน่งของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องการออกแบบ หน่วยเป็นเมตร

2.6 อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต กรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วนหรือใช้ผงหินปูนไม่เกิน 15% ให้ใช้ค่าเท่ากับ 0 กรณีใช้เถ้าลอยและผงหินปูนให้พิจารณาเฉพาะปริมาณเถ้าลอย

2.7 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีต

3. กดปุ่ม Calculate เพื่อคำนวณจะได้ค่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (C_s) หน่วยเป็นน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามสมการ 5.1-ง และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ที่ไม่มีรอยร้าว (D_k) ตามสมการที่ 5.1-ช และ 5.1-ซ

สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร
กรมโยธาธิการและผังเมือง
ถนนพระรามที่ 6 แขวงพญาไท
เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400
โทร. 0-2299-4321 โทรสาร 0-2299-4347