

การต้านทานการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิดตกผลึกคริสตัลไลน์

Water Permeable Resistance in Concrete Combined with Waterproofing Material Cement of Crystalline Type

วรัญ ณ สงขลา *

Warun Na Songkhla *

Received: 15 April 2020, Revised: 14 September 2020, Accepted: 9 October 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการต้านทานการซึมผ่านของน้ำและการสร้างชั้นผลึกคริสตัลไลน์ในคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ผลการวิจัยพบว่า ตัวอย่างที่ผสมวัสดุกันซึมมีความสามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดันได้มากกว่าตัวอย่างคอนกรีตควบคุม โดยมีค่าการซึมผ่านน้ำเฉลี่ยที่วัดได้อยู่ที่ 3.16 เซนติเมตร และ 7.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนค่าความหนาของการเกิดชั้นผลึกคริสตัลไลน์รอบๆ ผิวตัวอย่าง มีค่าความหนาประมาณ 2.5 - 3 เซนติเมตร เมื่อตัดส่วนที่เกิดผลึกออกจะมีการสร้างชั้นผลึกคริสตัลไลน์ขึ้นใหม่อีกครั้ง หากตัวอย่างได้สัมผัสกับน้ำจากภายนอก และผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS คอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์บริเวณผิวที่เกิดผลึก พบสารประกอบไททาเนียม (Ti) ซึ่งเป็นสารประกอบโลหะทรานซิชันในปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ จึงสามารถยืนยันผลทดสอบได้ว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมมีการสร้างผลึกคริสตัลไลน์ขึ้นจริงในเนื้อคอนกรีต ซึ่งมีผลที่สอดคล้องกับสารประกอบทางเคมีของวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิดตกผลึกคริสตัลไลน์ ที่มีสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์ผสมอยู่

คำสำคัญ: วัสดุกันซึมแบบซีเมนต์, คริสตัลไลน์, การซึมผ่านของน้ำ

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ 14 ถนนนันทบุรี 1 ตำบลบางกระสอ จังหวัดนนทบุรี 11000

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, 144 Nonthaburi 1 Road, Bang Krasor, Nonthaburi 11000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): warun.w@rmutsb.ac.th Tel: 08 6698 1389

ABSTRACT

The research aims to study water permeable resistance and crystallization of concrete mixed with cement-based waterproofing material. In this study, it demonstrates that the samples merged with waterproofing material result in better water permeable resistance capability under pressure condition than the regular concrete as the control sample. The average numbers of water permeability of the samples and the control one were 3.16 and 7.50 centimeters respectively whereas the thickness of crystalline layers occurring around the samples were 2.50 to 3 centimeters. When crystalline areas were cut, new crystalline areas were rebuilt under relevant water situation. Based on mineral analysis using EDS technique, the results demonstrated that Titanium compound, a transitional metal compound in polymer synthesis reaction, was detected at crystalline area of concrete combined with cement-based waterproofing material. This confirmed that concrete blended with waterproofing material generating crystals within concrete. In agreement with chemical compound of cement-based waterproofing material crystallization type, Titanium dioxide compound was internally mixed.

Key words: cement waterproofing, crystalline, water permeability

บทนำ

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีคุณสมบัติด้านการรับกำลังสามารถทำได้โดยง่ายและให้ผลที่ค่อนข้างชัดเจนตามสัดส่วนผสมที่ออกแบบไว้ แต่คุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตค่อนข้างมีความซับซ้อนมากกว่าคุณสมบัติด้านการรับกำลัง เนื่องจากสภาพแวดล้อมจริงที่คอนกรีตสัมผัสมีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลต่อการทำลายและไม่สามารถควบคุมได้ (Zhao *et al.*, 2011) เช่น โครงสร้างคอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำและความชื้นสูง ส่งผลให้ความคงทนของคอนกรีตลดลง เนื่องจากการซึมผ่านของน้ำที่เข้าทำลายเหล็กเสริมส่งผลให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างได้ การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตโดยใช้วัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพดี เช่น เถ้าถ่านหิน หรือเถ้าชีวมวลบดละเอียด และวัสดุกึ่งปอซโซลานกึ่งปูนซีเมนต์ เช่น ซิลิกาฟูม และตะกอนเตาถลุงเหล็ก ให้ผลไปในทิศทางที่ดีและสามารถเพิ่มการป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้

(Mindess *et al.*, 2002) ดังรายงานวิจัยของ Benthia and Mindess (1998) ได้ศึกษาหาค่าการซึมผ่านน้ำของซีเมนต์เพสต์โดยการศึกษาใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 3 โดยจะมีการเปรียบเทียบการผสมซิลิกาฟูม การให้ความดันน้ำเป็นลักษณะแรงอัดสามแกน การหาการซึมผ่านน้ำแสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต จากสมการของดาร์ซีที่สามารถสรุปได้ว่า ค่าการซึมผ่านน้ำจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาไฮเดรชัน หรือระยะเวลาการบ่ม และการผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 10 - 15 สามารถลดค่าการซึมผ่านน้ำได้ และในปีเดียวกัน Ludirdja *et al.* (1989) ได้ศึกษาวิธีการและเครื่องมือในการหาค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต โดยศึกษาผลของน้ำหนักกระทำ สภาพการบ่ม และการผสมซิลิกาฟูม การหาค่าการซึมผ่านน้ำแสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า ผลของน้ำหนักกระทำจะทำให้ค่าการซึมผ่านน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากตัวอย่างรับน้ำหนักร้อยละ 75

ของกำลังอัดประลัย ผลจากการบ่มในคอนกรีตธรรมชาติอุณหภูมิการบ่มที่เพิ่มสูงขึ้นจะเพิ่มค่าการซึมผ่านน้ำของตัวอย่างในขณะบ่ม (สำหรับตัวอย่างที่ถูกทำให้แห้งก่อนนำมาบ่ม) และผลของการผสมซิลิกาฟุ่มจะลดค่าการซึมผ่านน้ำได้

ในปัจจุบันการใช้สารเคมีในรูปแบบวัสดุกันซึมก็เป็นอีกทางเลือกที่มีอยู่แพร่หลายในอุตสาหกรรมการก่อสร้างในประเทศไทย แต่ข้อมูลด้านคุณสมบัติการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิด ตกผลึกคริสตัลไลน์ยังไม่มีข้อมูลที่แน่ชัดในด้านการต้านทานการซึมผ่านและการสร้างชั้นผลึก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาคุณสมบัติการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตและการสร้างชั้นผลึกคริสตัลไลน์ ที่ผสม

วัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิด ตกผลึกคริสตัลไลน์ให้ข้อมูลที่แน่ชัดมากขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยและสัดส่วนผสมคอนกรีต

วัสดุกันซึมที่นำมาวิจัย คือ ซีเมนต์กันซึม Penetron Admix (PA) ชนิดตกผลึก (Integral Crystalline Waterproofing Admixture) สำหรับผสมในคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 1 และสารประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยอัตราส่วนที่ใช้ ร้อยละ 1 ต่อ น้ำหนักปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ไม่มีผลกระทบต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีตในช่วง 7.5 - 12.5 เซนติเมตร ตามการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีต และเป็นอัตราส่วนผสมสูงสุดที่ผู้ผลิตแนะนำ



ภาพที่ 1 วัสดุกันซึม ชนิด ตกผลึก

ตารางที่ 1 สารประกอบทางเคมีของวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิด ตกผลึกคริสตัลไลน์

Compound	Integral Crystalline Waterproofing Admixture (%)
CaO	44
SiO ₂	17.6
Fe ₂ O ₃	1.6
Al ₂ O ₃	1.3
SO ₃	1.5
MgO	1.0
K ₂ O	0.3
Na ₂ O	2.3
TiO ₂	1.17
Other	36.73
Carbon	3.1

การออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีต โดยกำหนดค่ากำลังอัดประลัยที่ 28 วัน เท่ากับ 32 MPa (เป็นกำลังอัดที่ใช้โดยทั่วไปในโครงสร้างคอนกรีตด้านอุตสาหกรรม และวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิดตกผลึกคริสตัลไลน์ก็ถูกนำมาใช้ในงานการก่อสร้างประเภทอุตสาหกรรมเป็นหลัก) อัตราน้ำต่อ

ปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.54 ค่าการยุบตัวอยู่ที่ 7.5 - 12.5 เซนติเมตร และแสดงอัตราส่วนผสมคอนกรีต ดังตารางที่ 2 โดยกำหนดชื่อเรียกตัวอย่าง ดังนี้ ตัวอย่างที่ไม่ผสมวัสดุกันซึมจะเรียกว่า ตัวอย่างควบคุม (Control) และตัวอย่างที่ผสมวัสดุกันซึมจะเรียกว่า ตัวอย่างคริสตัลไลน์ (Crystalline)

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

Mix Proportion (kg/m ³)				
Cement	Water	Aggregates		Crystalline Admix
		Fine	Coarse	
		Control		
362	196	870	1,010	-
Crystalline				
362	196	870	1,010	3.62

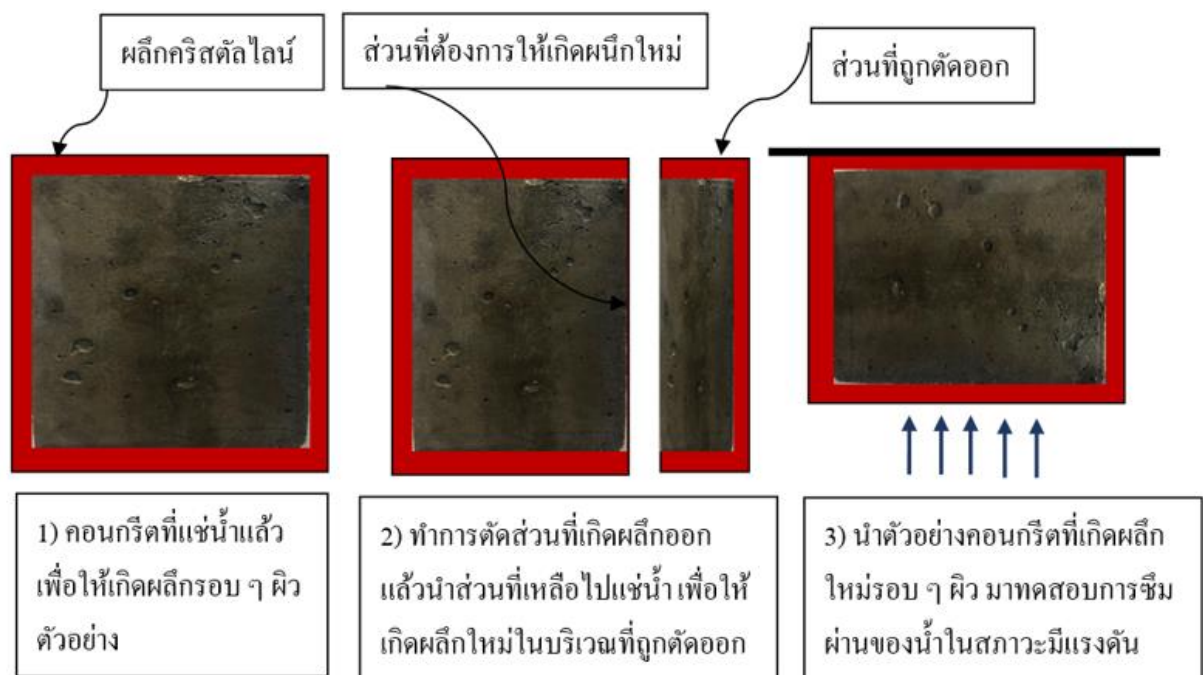
2. ขั้นตอนการวิจัย

นำตัวอย่างคอนกรีตขนาด 15×15×15 เซนติเมตร ที่ผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ชนิด

คริสตัลไลน์ในเนื้อคอนกรีตบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน เพื่อให้ได้กำลังตามที่ออกแบบส่วนผสมไว้ และให้เกิดผลึกคริสตัลไลน์ในตัวอย่างคอนกรีต (การสร้าง

ชั้นผลึกคริสตัลไลน์จะต้องอาศัยการซึมผ่านเบื้องต้นของน้ำจากภายนอกเป็นหลัก จะอาศัยแค่ปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตนั้นไม่เพียงพอและน้ำในส่วนนี้จะใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลัก การซึมผ่านของน้ำจากภายนอกในปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยากับวัสดุกันซึม ส่งผลให้เกิดการสร้างชั้นผลึกคริสตัลไลน์ขึ้นรอบๆ ผิวของตัวอย่างในปริมาณที่หนาแน่นกว่าบริเวณภายในเนื้อตัวอย่าง ชั้นผลึกคริสตัลไลน์ที่เกิดขึ้นจะป้องกันน้ำไม่ให้ซึมผ่านเข้าไปในตัวอย่างได้อีก การเกิดผลึกภายในตัวอย่างจึงไม่สามารถเกิดขึ้นเพิ่มเติมจากเดิมได้อีก (Kunlong *et al.*, 2019; José *et al.*, 2019; Wongprachum, 2019) นำตัวอย่างที่เกิดชั้นผลึกแล้วไปทดสอบการซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดันตามมาตรฐาน DIN 1048: Teil 5 (1991) หลังจากนั้น

ทำการตัดส่วนรอบๆ พื้นผิวตัวอย่างที่เกิดผลึกออกในการทดสอบส่วนนี้เพื่อต้องการที่จะทราบว่า หากตัวอย่างที่ถูกตัดส่วนที่เกิดผลึกรอบผิวตัวอย่างออกแล้ว จะมีการสร้างชั้นผลึกขึ้นมาใหม่แทนที่ชั้นผลึกเก่าอีกครั้งหรือไม่ ในขณะที่ตัวอย่างสัมผัสกับน้ำจากภายนอกอีกครั้ง โดยนำตัวอย่างคอนกรีตส่วนที่เหลือไปแช่น้ำที่ 28 วัน เพื่อให้เกิดชั้นผลึกอีกครั้ง (สารประกอบของวัสดุกันซึมที่อยู่ภายในเนื้อตัวอย่างจะไม่สามารถสร้างผลึกคริสตัลไลน์เพิ่มเติมได้ เพราะถูกชั้นผลึกคริสตัลไลน์รอบๆ ผิวตัวอย่างป้องกันไม่ให้น้ำจากภายนอกซึมเข้าไปได้ จึงต้องตัดส่วนที่เกิดผลึกรอบๆ พื้นผิวตัวอย่างออกเพื่อให้ น้ำซึมเข้าทำปฏิกิริยาต่อไปได้) และนำตัวอย่างกลับมาทดสอบการซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดันอีก ตามภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ลักษณะการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

3. มาตรฐานการทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

3.1 การทดสอบการต้านทานการซึมผ่านของน้ำ

การทดสอบการต้านทานการซึมผ่านของน้ำเป็นไปตามมาตรฐาน DIN 1048: Teil 5 (1991) โดยจะทำการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึม

แบบซีเมนต์ชนิดคริสตัลไลน์ในเนื้อคอนกรีตที่เกิดผลึกคริสตัลไลน์รอบๆ ขั้นตอนการทดสอบจะทำการอัดก้อนตัวอย่างด้วยความดันน้ำ 500 kPa เป็นเวลา 48

ชั่วโมง หลังจากนั้นผ่าก้อนทดสอบออกและทำการวัดความลึกของน้ำที่ผ่านเข้ามาในเนื้อตัวอย่างทดสอบ เครื่องทดสอบดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การทดสอบการต้านทานการซึมผ่านของน้ำตามมาตรฐาน DIN 1048: Teil 5 (1991)

3.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ โดยทดสอบตามมาตรฐาน

BS 1881: Part 4 (1970) โดยใช้ก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด $15 \times 15 \times 15$ เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์

3.3 การทดสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิดคริสตัลไลน์

การถ่ายภาพขยายกำลังสูงโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) แบบส่องกราด เป็นการสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของ ตัวอย่างที่

ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็น
ภาพลักษณะของ 3 มิติ

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค
Energy Dispersive Spectrometry (EDS) แบบส่อง

กราด เป็นเครื่องมือตัวหนึ่งที่อยู่ในระบบของ SEM
สำหรับใช้วิเคราะห์ธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง
ซึ่งทำหน้าที่รับสัญญาณ X-Ray จากสารตัวอย่าง ดัง
แสดงในภาพที่ 5



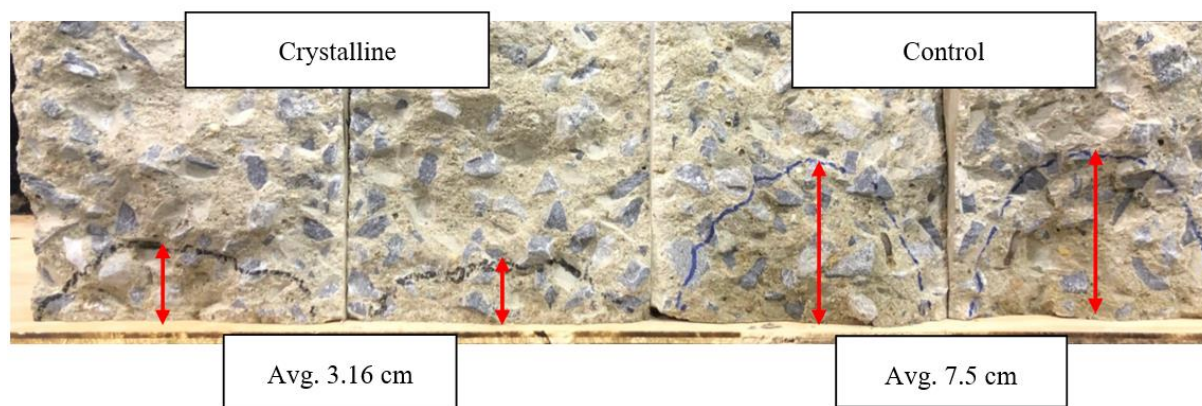
ภาพที่ 5 เครื่อง Scanning Electron Microscope และ Energy Dispersive Spectrometry

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การต้านทานการซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดัน

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติการต้านทานการ
ซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดันของตัวอย่างที่ผสม
วัสดุกันซึมคริสตัลไลน์ (Crystalline) กับตัวอย่าง
คอนกรีตควบคุม (Control) โดยทำการผ่าตัวอย่าง
ออกแล้ววัดค่าเฉลี่ยของรอยน้ำที่เกิดขึ้นจากการซึม
ผ่านของน้ำในเนื้อตัวอย่างคอนกรีต พบว่า ตัวอย่างที่
ผสมวัสดุกันซึมคริสตัลไลน์ มีความสามารถต้านทาน
การซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดันได้มากกว่า
ตัวอย่างคอนกรีตควบคุม โดยมีค่าการซึมผ่านน้ำ

เฉลี่ยที่วัดได้อยู่ที่ 3.16 เซนติเมตร และ 7.5
เซนติเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 6 เนื่องจาก
เกิดการสร้างขึ้นผลึกคริสตัลไลน์ในเนื้อคอนกรีต
บริเวณรอบๆ ผิวตัวอย่างที่ผสมวัสดุกันซึม
คริสตัลไลน์ โดยชั้นผลึกคริสตัลไลน์ที่เกิดขึ้นจะอุด
ปิดช่องว่างโพรงและรอยร้าวขนาดเล็กในเนื้อ
คอนกรีต ทำให้คอนกรีตบริเวณที่สร้างขึ้นผลึก
คริสตัลไลน์ มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้
คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้อง
กับรายงานวิจัยของ (Nasiru *et al.*, 2015; Kunlong *et al.*, 2019; José *et al.*, 2019)



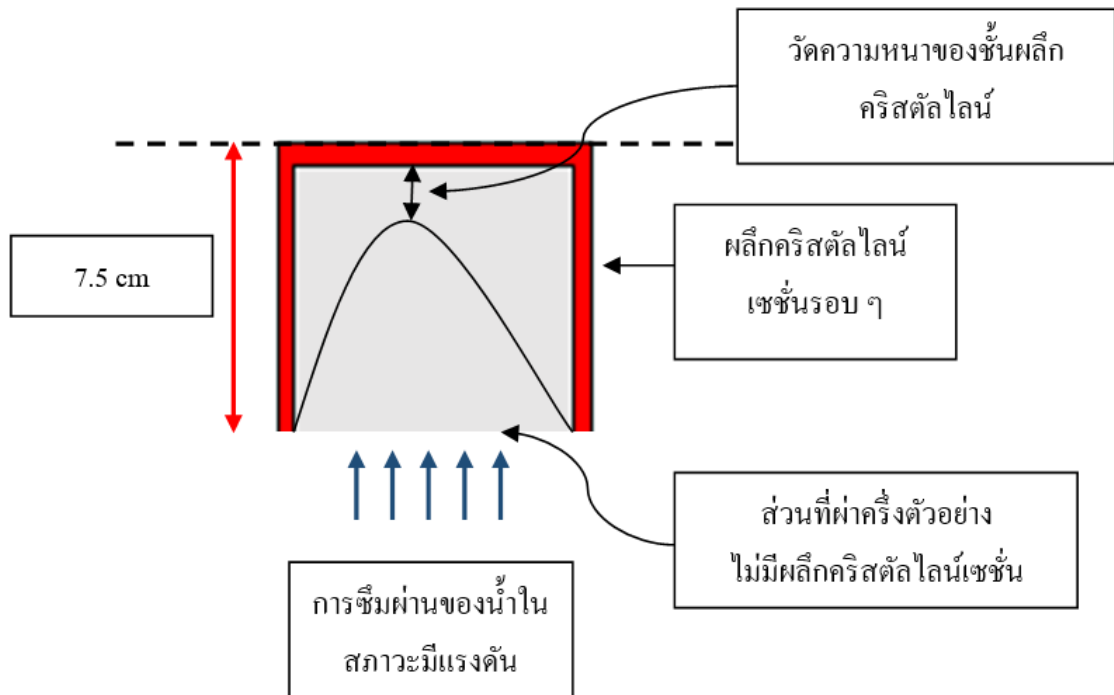
ภาพที่ 6 แสดงระยะการซึมของน้ำที่ตัวอย่างขนาด 15×15×15 เซนติเมตร

2. ค่าความหนาชั้นผลึกคริสตัลไลน์ที่เกิดขึ้นรอบๆ

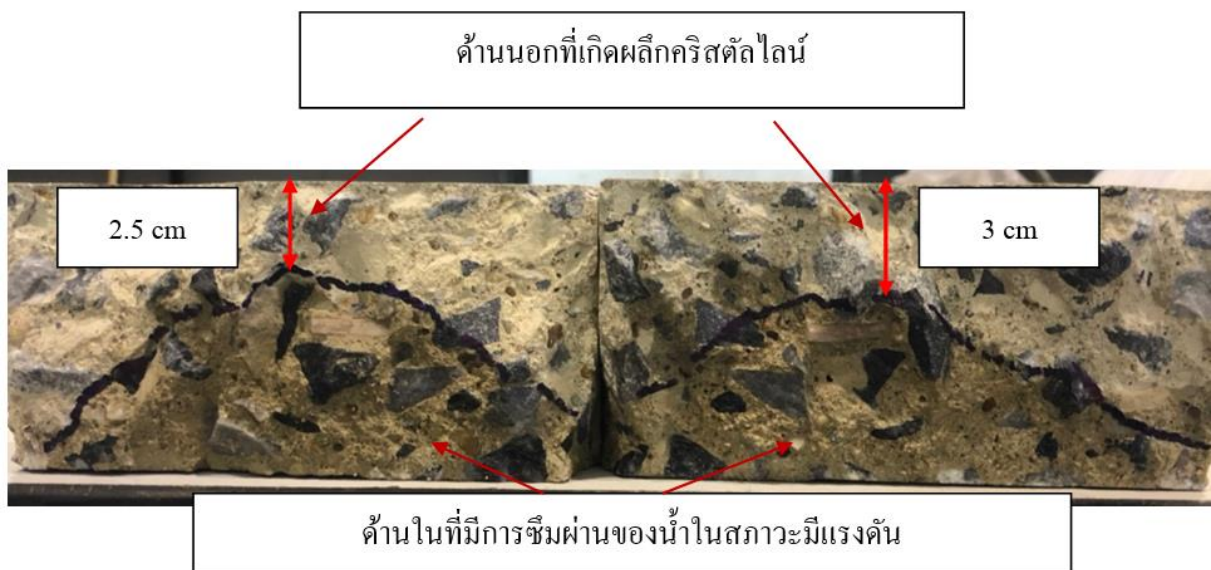
ตัวอย่างที่ผสมวัสดุกันซึม

หลังจากได้ค่าการต้านทานการซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดัน เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงทำการทดสอบหาค่าความหนาของการเกิดชั้นผลึกคริสตัลไลน์ที่เกิดขึ้นรอบตัวอย่างที่ผสมวัสดุกันซึม คริสตัลไลน์ (Crystalline) สามารถทำได้โดยการผ่าครึ่งตัวอย่าง (ให้มีขนาดความหนา 7.5 เซนติเมตร เท่ากับความหนาที่น้ำซึมผ่านในตัวอย่างควบคุมเฉลี่ยที่ 7.5 เซนติเมตร) ที่มีการสร้างชั้นผลึกคริสตัลไลน์ในเนื้อคอนกรีตบริเวณรอบผิวตัวอย่างออก 1 ด้าน แล้วนำด้านที่ตัดชั้นผลึกคริสตัลไลน์ออกไปทดสอบการซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดัน ดังแสดงในภาพที่ 7 หลังจากนั้นทำการวัดค่าความหนาส่วนที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ พบว่า ส่วนที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ จะมีความหนาประมาณ 2.5 - 3 เซนติเมตร ซึ่งเป็นชั้นความหนาของผลึกคริสตัลไลน์ที่เกิดขึ้นรอบๆ ผิวตัวอย่างหลังจากสัมผัสกับน้ำจากภายนอก ดังแสดงในภาพที่ 8 โดยที่สารประกอบของวัสดุกันซึมที่อยู่ภายในตัวอย่างยังไม่สามารถสร้างชั้นผลึกคริสตัลไลน์ได้เต็มที่ และชั้นผลึกคริสตัลไลน์ที่เกิดขึ้นรอบๆ ผิวของตัวอย่างในปริมาณที่หนาแน่น

กว่าบริเวณภายในเนื้อตัวอย่างนั้น เนื่องจากต้องอาศัยการซึมผ่านเบื้องต้นของน้ำจากภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และชะล้างสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ในตัวอย่างให้ละลายตัวออกมา แล้วจึงทำปฏิกิริยากับสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) และสารประกอบอื่นๆ (Other) ที่มีในวัสดุกันซึม ส่งผลให้เกิดการสร้างชั้นผลึกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และผลึกคริสตัลไลน์รอบๆ ผิวตัวอย่าง เมื่อผลึกเกิดขึ้นหนาแน่นสมบูรณ์แล้ว น้ำจากภายนอกก็ไม่สามารถซึมผ่านชั้นผลึกคริสตัลไลน์เข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้อีก (Kunlong *et al.*, 2019; José *et al.*, 2019; Wongprachum, 2019) ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับปฏิกิริยาของวัสดุกึ่งปอซโซลานและกึ่งปูนซีเมนต์ (Mindess *et al.*, 2002; Guangyan *et al.*, 2019) และจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ยังพบสารประกอบทางเคมีของวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิด ตกผลึกคริสตัลไลน์ ที่มีสารประกอบไททานเนียมไดออกไซด์ผสมอยู่ในผลึกคริสตัลไลน์ที่เกิดขึ้นรอบผิวตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ 7 แบบจำลองการทดสอบหาค่าความหนาของชั้นผลึกคริสตัลไลน์ที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวอย่างที่ผสมวัสดุกันซึม



ภาพที่ 8 ความหนาของชั้นผลึกคริสตัลไลน์รอบ ๆ ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมคริสตัลไลน์

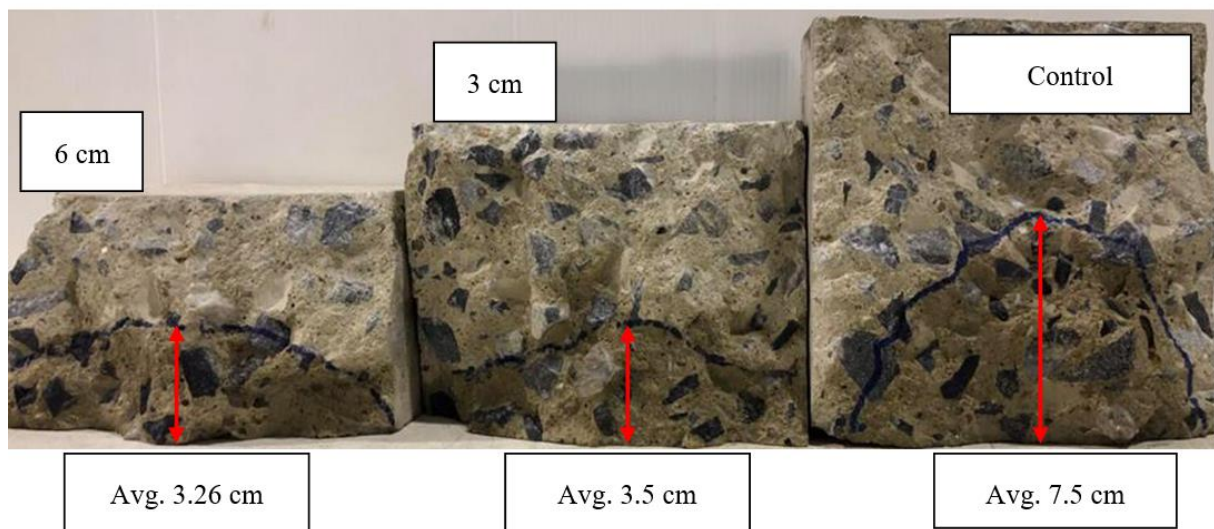
3. การสร้างชั้นผลึกคริสตัลไลน์ใหม่ภายในเนื้อโครงสร้างคอนกรีตหลังตัดชั้นผลึกภายนอกออก

ในหัวข้อนี้จะเป็นการตรวจหาชั้นผลึกคริสตัลไลน์ที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ภายในเนื้อโครงสร้างคอนกรีตหลังจากตัดชั้นผลึกรอบๆ ผิวตัวอย่างออกแล้ว โดยเป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า เมื่อน้ำ

จากภายนอกไม่สามารถซึมผ่านชั้นผลึกคริสตัลไลน์รอบผิวตัวอย่างได้ การผลึกภายในตัวอย่างจึงไม่สามารถเกิดขึ้นเพิ่มเติมจากเดิมได้ ชั้นผลึกคริสตัลไลน์ที่เกิดขึ้นรอบๆ ผิวของตัวอย่างในปริมาณที่หนาแน่นกว่าบริเวณภายในเนื้อตัวอย่างนั้น ต้องอาศัยการซึมผ่านเบื้องต้นของน้ำจากภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยา

ผู้วิจัยได้ตั้งสมมุติฐานว่า หากมีการตัดส่วนชั้นผลึกคริสตัลไลน์รอบๆ ผิวตัวอย่างออก และให้ส่วนที่เหลือได้สัมผัสกับการเกิดผลึกคริสตัลไลน์จะสามารถเกิดขึ้นได้อีกครั้ง และเมื่อได้ทราบค่าความหนาของการเกิดชั้นผลึกคริสตัลไลน์ที่เกิดขึ้นรอบๆ ผิวตัวอย่างแล้ว จึงทำการตัดตัวอย่างคอนกรีตส่วนที่เกิดผลึกออกที่ระยะ 3 เซนติเมตร และ 6 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระยะที่ลึกเกินความหนาของชั้นผลึกคริสตัลไลน์รอบๆ ผิวตัวอย่าง นำตัวอย่างคอนกรีตส่วนที่เหลือไปแช่น้ำให้เกิดผลึก และจากนั้นนำตัวอย่างกลับมาทดสอบการซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดันอีกครั้ง โดยที่สามารถเปรียบเทียบค่าการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดันกับตัวอย่างคอนกรีตควบคุม (Control) พบว่า ตัวอย่างที่ผสมวัสดุกันซึม

คริสตัลไลน์ (Crystalline) ที่ได้ตัดส่วนที่เกิดผลึกออกที่ระยะ 3 เซนติเมตร 6 เซนติเมตร และตัวอย่างคอนกรีตควบคุม มีค่าการซึมผ่านของน้ำอยู่ที่ 3.26 เซนติเมตร 3.5 เซนติเมตร และ 7.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 9 ตัวอย่างที่ผสมวัสดุกันซึมคริสตัลไลน์จะสามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำได้ดีกว่าตัวอย่างควบคุมประมาณ 2.14 เท่า ซึ่งจากผลการทดสอบสามารถบ่งชี้ได้ว่า ตัวอย่างคอนกรีตที่ตัดส่วนที่เกิดผลึกรอบๆ ผิวตัวอย่างออก ที่ระยะ 3 เซนติเมตร และ 6 เซนติเมตร สามารถสร้างชั้นผลึกคริสตัลไลน์ขึ้นใหม่รอบๆ ผิวตัวอย่างได้อีกครั้ง และผลการซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างคอนกรีตควบคุม ก็มีค่าเท่ากับค่าการต้านทานการซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดัน



ภาพที่ 9 ผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างที่สร้างชั้นผลึกคริสตัลไลน์ใหม่

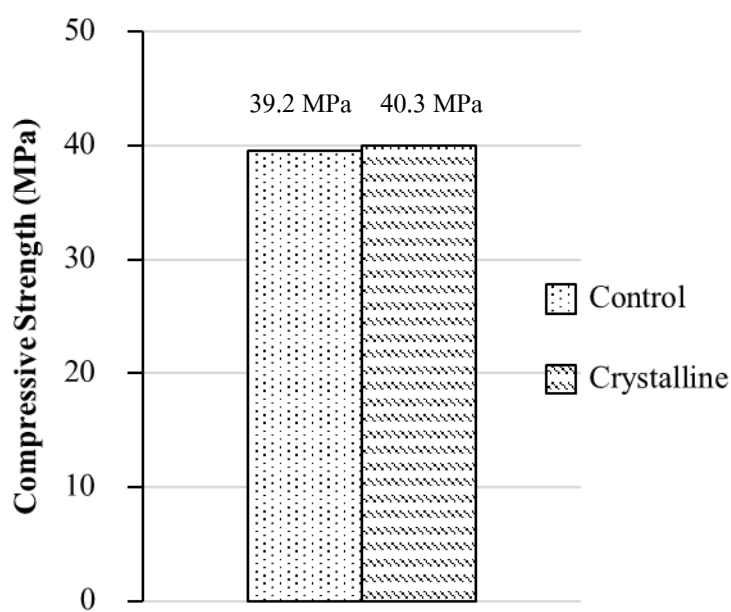
4. กำลังอัดของคอนกรีตผสมวัสดุกันซึมคริสตัลไลน์

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength of Concrete) ที่บ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน พบว่า ค่ากำลังอัดสูงสุดของตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมคริสตัลไลน์ (Crystalline) มีค่าเท่ากับ 40.3 MPa สูงกว่าตัวอย่างคอนกรีตควบคุม (Control) ที่มีค่าเท่ากับ 39.2 MPa เพียง

เล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 10 เนื่องจากการทดสอบกำลังอัดแบบทำลาย ค่าการต้านทานกำลังอัดแบบทำลายมาจากโครงสร้างภายในเนื้อตัวอย่างคอนกรีตเป็นหลัก ชั้นผลึกคริสตัลไลน์จะเกิดขึ้นรอบๆ ผิวของตัวอย่างในปริมาณที่หนาแน่นกว่าบริเวณภายในเนื้อตัวอย่างคอนกรีต และตัวอย่างคอนกรีตจะรับแรงอัดเต็มพื้นที่หน้าตัดเกิดการส่งผ่านกระจายแรงไปทั่ว

โครงสร้างภายในเนื้อของตัวอย่างคอนกรีต ตัวอย่างคอนกรีตรับแรงจนถึงระดับใกล้สู่การวิบัติจะเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro Crack) ขึ้นภายในเนื้อโครงสร้างคอนกรีตจนถึงระดับที่ตัวอย่างคอนกรีตไม่สามารถรับกำลังต่อไปได้ รอยร้าวขนาดเล็กจะ

ขยายตัวนำไปสู่รอยร้าวขนาดใหญ่ (Macro Crack) ส่งผลให้เกิดการวิบัติในตัวอย่างคอนกรีต (Mindess *et al.*, 2002) เพราะเหตุนี้การผสมวัสดุกันซึมคริสตัลไลน์ จึงไม่ส่งผลให้มีค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นจากเดิมมากนัก



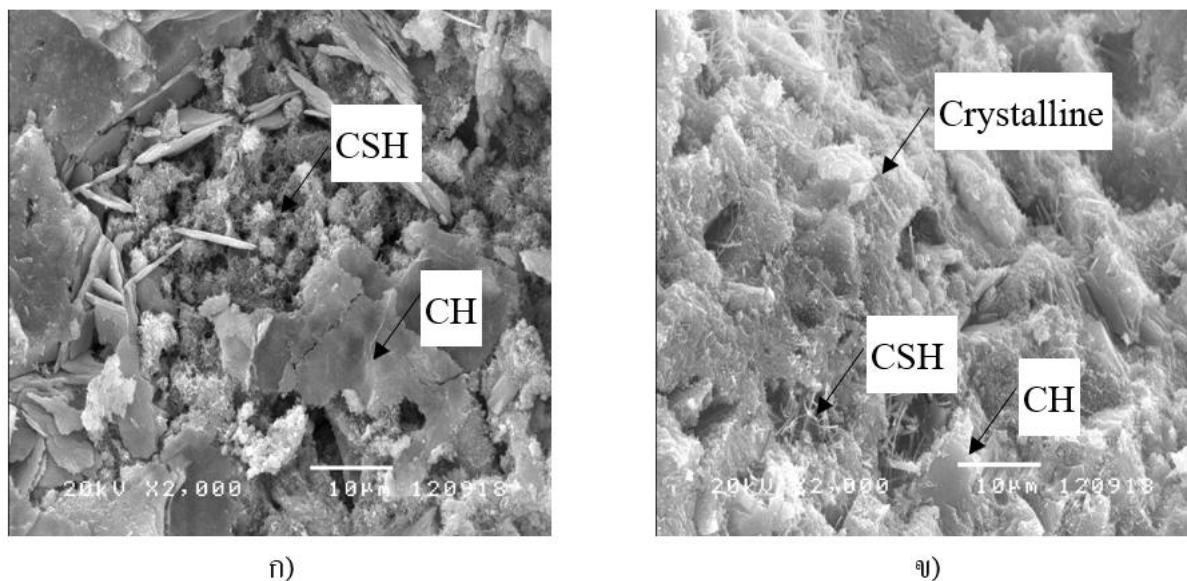
ภาพที่ 10 ผลการทดสอบกำลังอัด

5. ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิด คริสตัลไลน์

การเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำมาทดสอบการถ่ายภาพขยายกำลังสูงโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectrometry (EDS) โดยจะเก็บตัวอย่างบริเวณผิวที่เกิดขึ้นผลึกคริสตัลไลน์ของคอนกรีตผสมวัสดุกันซึม (Crystalline) ที่ช่วงระยะ 2.5 - 3 เซนติเมตร และตัวอย่างคอนกรีตควบคุม (Control) ก็จะเก็บในตำแหน่งเดียวกัน

5.1 การถ่ายภาพขยายกำลังสูงโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

จากภาพถ่ายขยายกำลังสูงโดยใช้เครื่อง SEM แบบส่องกราด พบว่า บริเวณผิวที่เกิดผลึกคริสตัลไลน์ของคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึม มีผลึกคริสตัลไลน์เกิดขึ้น และการเกิดผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CSH) เกิดขึ้นหนาแน่นและกระจายตัวในโครงสร้างภายในมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตควบคุม ดังแสดงในภาพที่ 11



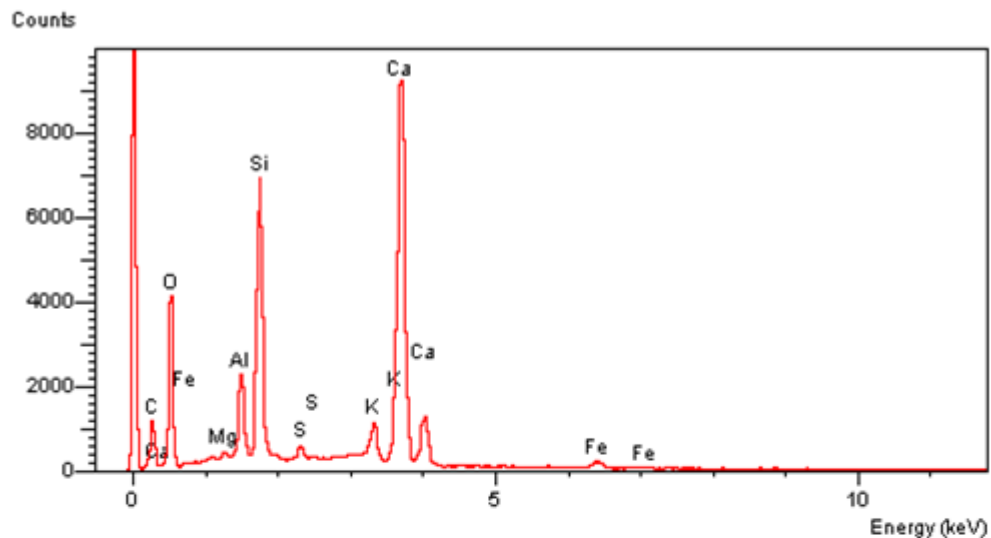
ภาพที่ 11 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

ก) คอนกรีตควบคุม ข) คอนกรีตผสมวัสดุกันซึม

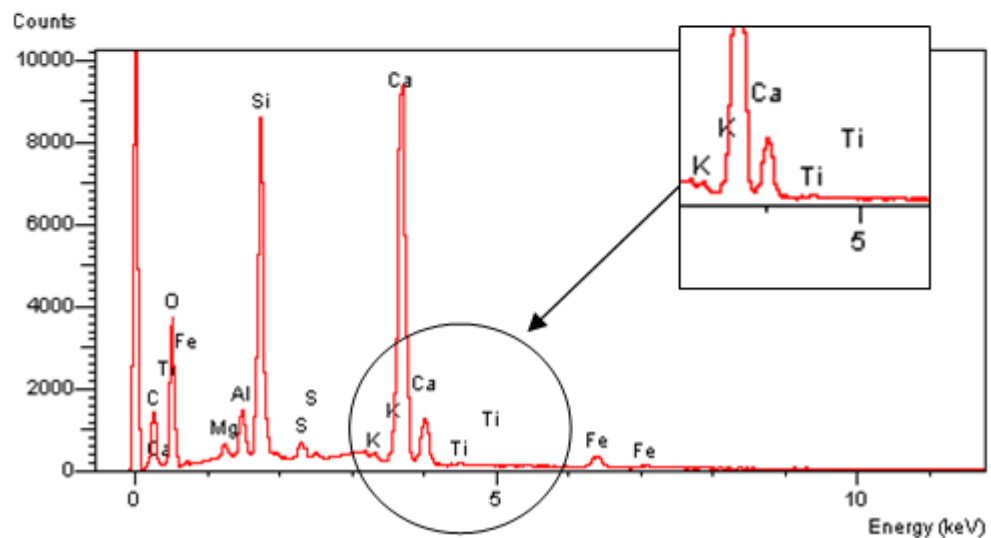
5.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectrometry (EDS)

จากผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS แบบส่องกราด พบว่า คอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิดคริสตัลไลน์ บริเวณผิวที่เกิดผลึกพบสารประกอบไททาเนียม (Ti) ซึ่งเป็นสารประกอบโลหะทรานสิชันในปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์และโครงสร้างผลึกคริสตัลไลน์ก็จัดอยู่ในรูปแบบพอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง (Mandelkern, 1964; Michael *et al.*,

2016; Vanessa *et al.*, 2016) แต่ในตัวอย่างคอนกรีตควบคุม ไม่พบสารประกอบไททาเนียม (Ti) ดังแสดงในภาพที่ 12 จึงสามารถยืนยันผลทดสอบได้ว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมมีการสร้างผลึกคริสตัลไลน์ขึ้นจริงในเนื้อคอนกรีตบริเวณผิวที่ทดสอบ และมีผลที่สอดคล้อง กับสารประกอบทางเคมีของวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิดคผลึกคริสตัลไลน์ ที่มีสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide : TiO_2) ผสมอยู่ร้อยละ 1.17



ก)



ข)

ภาพที่ 12 การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectrometry (EDS)

ก) คอนกรีตควบคุม (Control) ข) คอนกรีตผสมวัสดุกันซึม (Crystalline)

สรุป

ตัวอย่างที่ผสมวัสดุกันซึมมีความสามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดันได้มากกว่าตัวอย่างคอนกรีตควบคุม โดยมีค่าการซึมผ่านน้ำเฉลี่ยที่วัดได้อยู่ที่ 3.16 เซนติเมตร และ 7.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนค่าความหนาของการเกิดขึ้นผลึกคริสตัลไลน์รอบๆ ผิวตัวอย่าง มีค่าความหนาประมาณ 2.5 - 3 เซนติเมตร เมื่อตัดส่วนที่เกิดผลึกออกจะมีการสร้างชั้นผลึกคริสตัลไลน์ขึ้นใหม่อีกครั้ง

หากตัวอย่างได้สัมผัสกับน้ำจากภายนอก จากภาพถ่าย SEM แบบส่องกราด พบว่า บริเวณผิวที่เกิดผลึกคริสตัลไลน์ของคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึม มีผลึกคริสตัลไลน์เกิดขึ้น และการเกิดผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CSH) เกิดขึ้นหนาแน่นและกระจายตัวในโครงสร้างภายในมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตควบคุม และผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS คอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์บริเวณผิวที่เกิดผลึก พบสารประกอบไททาเนียม (Ti) ซึ่งเป็น

สารประกอบโลหะทรานซิชันในปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ จึงสามารถยืนยันผลทดสอบได้ว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมมีการสร้างผลึกคริสตัลไลน์ขึ้นจริงในเนื้อคอนกรีต ซึ่งมีผลที่สอดคล้องกับสารประกอบทางเคมีของวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิดตกผลึกคริสตัลไลน์ ที่มีสารประกอบไททานเนียมไดออกไซด์ผสมอยู่ร้อยละ 1.17

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และบริษัทเพนตรอน (ไทยแลนด์) จำกัด ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่สนับสนุนเครื่องมือและสถานที่จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

- Benthia, N. and Mindess, S. 1998. Water Permeability of Cement Paste. **Cement and Concrete Research** 19(5): 727-736.
- BS 188: Part 4. 1970. **Methods of Testing Concrete for Strength**. British Standard (BS). London, England. Available Source: <https://www.techstreet.com>, March 25, 2019.
- DIN 1048: Teil 5. 1991. **Testing Concrete, Testing of Hardened Concrete**. German Industrial Standard (DIN), Prüfverfahren für Beton, Jun, Berlin, Germany. Available Source: <https://www.beuth.de/de/norm/din-1048-5/1708160>, March 20, 2019.
- Guangyan, L., Xiaofeng, H., Jiesheng, L., Xiang, J. and Xinya, Z. 2019. Activated Chemicals of Cementitious Capillary Crystalline Waterproofing Materials and Their Self-healing Behavior. **Construction and Building Materials** 200(1): 36-45.
- José, L.G.C., Mercedes, S.M., Pedro, C., Filipe, P. and Fabiano, T. 2019. Improvement of the Concrete Permeability by Using Hydrophilic Blended Additive. **General Materials Science** 12(15): 1-12.
- Kunlong, Z., Xiaohua, Y., Rui, C. and Lixiao, X. 2019. Application of A Capillary Crystalline Material to Enhance Cement Grout for Sealing Tunnel Leakage. **Construction and Building Materials** 214: 497-505.
- Ludirdja, D., Berger, R.L. and Young, J.F. 1989. Simple Method for Measuring Water Permeability of Concrete. **ACI Materials Journal** 86(5): 433-439.
- Mandelkern, L. 1964. **Crystalline of Polymers**. Mc Graw - Hill, New York.
- Michael, C., Zhang, B.H.G. and Jun, X. 2016. A Review on Polymer Crystalline Theories. **Crystals Journal** 7(1): 1-37.
- Mindess, S., Young, J.F. and Darwin, D. 2002. **Concrete**. 20nd ed. Pearson Education, New Jersey.
- Nasiru, Z.M., Ali, K.M., Majid, Z.A.M. and Arezou, S. 2015. Waterproof Performance of Concrete: A Critical Review on Implemented Approaches. **Construction and Building Materials** 101(1): 80-90.

- Vanessa, P., Mirna, C.B., Rudy, G., Marie, F.B., Philippe, M. and Samuel, B. 2016. Polymer-Derived Si-C-Ti Systems: From Titanium Nanoparticle-Filled Polycarbosilanes to Dense Monolithic Multi-Phase Components with High Hardness. **Journal of the European Ceramic Society** 36(15): 3671-3679.
- Wongprachum, W. 2019. The Crystallization of Cement Waterproofing Coated on Concrete Surface. **The Journal of Industrial Technology** 7(2): 42-50. (in Thai)
- Zhao, F.Q., Li, H. and Liu, S.J. 2011. Preparation and Properties of An Environment Friendly Polymer-Modified Waterproof Mortar. **Construction and Building Materials** 25(5): 2635-2638.