

การเปรียบเทียบลักษณะทางฟิสิกส์ระหว่างปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 Comparison between Physical Properties of Hydraulic Cement and Portland Cement Type I

สุวัฒน์ งามจันทร์^{1,*} และ ธนิต ใจสะอาด¹

¹ ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาคาร สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร กรมโยธาธิการและผังเมือง

*Corresponding author; E-mail address: tience14@hotmail.com

บทคัดย่อ

กรมโยธาธิการและผังเมืองได้ดำเนินการปรับปรุงแก้ไขมาตรฐานกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร มยผ. 1101 - 52 ถึง มยผ. 1106 - 52 เป็นมาตรฐานกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร มยผ. 1101 - 64 ถึง มยผ. 1106 - 64 ซึ่ง มยผ. 1101 - 64 มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้มีการเพิ่มเติมนิยามปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกให้เป็นปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานก่อสร้างโครงสร้างได้ ซึ่งกรมโยธาธิการและผังเมืองได้ร่วมกับสมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย (TCMA) สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (TCA) และสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (SIIT) ศึกษาสมบัติที่สำคัญของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทำการศึกษาลักษณะทางฟิสิกส์ ได้แก่ ค่าความชื้นเหลวปกติ ระยะเวลาในการก่อตัว กำลังอัด และการซึมผ่านของคลอไรด์ ของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกตาม มอก.2594-2556 จากผู้ผลิต 6 ราย เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยผลการทดสอบพบว่าซีเมนต์เพลสท์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีระยะเวลาก่อตัวต้นและระยะการก่อตัวปลายเร็วกว่าซีเมนต์เพลสท์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 นอกจากนี้การทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตทั้ง 2 ชนิด พบว่าค่าความต้านทานต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ใกล้เคียงกัน โดยผลการทดสอบในครั้งนี้ได้นำมาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการปรับปรุงแก้ไขมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ.1101-64 มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งปัจจุบันกรมโยธาธิการและผังเมืองได้เผยแพร่มาตรฐานนี้ให้ทั้งหน่วยงานของกรมโยธาธิการและผังเมืองและหน่วยงานอื่นของรัฐในทุกจังหวัด เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาการนำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมาใช้ในงานก่อสร้างของตน เพื่อร่วมขับเคลื่อนมาตรการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยต่อไป

คำสำคัญ: การซึมผ่านของคลอไรด์, กำลังอัด, ปูนซีเมนต์, ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง

Abstract

Department of Public Works and Town & Country Planning (DPT) had revised the standard of specifications for material used in building structures (DPT. 1101-52 to DPT. 1106-52) to the standard of specifications for material used in building structures (DPT. 1101-64 to DPT. 1106-64) that led to the adoption of hydraulic cement as cement used in building structures in the concrete and reinforced concrete standard (DPT 1101-64). To verify some properties of hydraulic cement similar to Portland

cement, DPT cooperating with Thai Cement Manufacturers Association (TCMA), Thailand Concrete Association (TCA) and International Institute of Technology (SIIT) studied the physical properties including normal consistency, setting times, compressive strength and chloride penetration testing of hydraulic cement according to TIS. 2594-2556, from six different manufacturer and compared to those of Portland cement type I (OPC1). The results show that the initial setting time and final setting time of cement paste made of hydraulic cement are less than those of cement paste made of OPC1. Compressive strength at the age of 28 days of concrete made of hydraulic cement is higher than those made of OPC1. Additionally, chloride penetration test results from both types of concrete show the similar resistance. Finally, these results were used as reference data to revise DPT 1101-64 standard. Currently, DPT distributed this improved DPT 1101-64 to DPT's sub-department, including central and provincial, and other provincial-level government agency in every province so they can implement hydraulic cement in their construction projects in order to promote Thailand's green-house gas reduction policy.

Keywords: cement, chloride penetration testing, compressive strength, DPT standard, hydraulic cement

1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าภาวะโลกร้อน (Global Warming) เป็นสาเหตุของการเกิดสภาวะอากาศสุดขั้ว (Extreme Weather) ในทุกวันนี้ ซึ่งเป็นผลมาจากการดำเนินกิจกรรมของมนุษย์ที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกขึ้นไปในชั้นบรรยากาศ ซึ่งก๊าซเรือนกระจกประกอบด้วยก๊าซหลายชนิด ที่สำคัญคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน ก๊าซไนตรัสออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ ก๊าซโอโซน สารคลอโรฟลูออโรคาร์บอน และฮาโลคาร์บอน โดยก๊าซเรือนกระจกที่มีมากที่สุดในชั้นบรรยากาศคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนใหญ่นั้นมาจากการเผาผลาญเชื้อเพลิงฟอสซิล คือ น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน ก๊าซเหล่านี้สามารถเก็บกักรังสีความร้อนจากผิวโลกแล้วคายรังสีความร้อนนั้นกลับลงมาทำให้อุณหภูมิบนผิวโลกร้อนขึ้นกว่าเดิม เปรียบเสมือนกระจกที่สะท้อนรังสีความร้อนไม่ให้ออกไปจากโลก จึงมักเรียกว่า ปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) และเรียกการปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งมีหลายชนิดให้เข้าใจง่ายว่า การปล่อยคาร์บอน (carbon emission) [1]

จากรายงานแห่งชาติฉบับที่ 3 ปี พ.ศ. 2556 พบว่าประเทศไทยมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 318.66 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์

เทียบเท่า (MtCO₂eq) โดยพบว่าสาขาพลังงานปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด เท่ากับ 237 MtCO₂eq คิดเป็นการปล่อยร้อยละ 74 ของปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด รองลงมาภาคการเกษตรร้อยละ 16 ภาคกระบวนการทางอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ ร้อยละ 6 และภาคของเสีย ร้อยละ 4 ตามลำดับ [2] ซึ่งประเทศไทยได้เข้าร่วมเป็นภาคีความตกลงปารีส (The Paris Agreement) ภายใต้อนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change หรือ UNFCCC และเสนอเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศที่ร้อยละ 20-25 จากกรณีปกติภายในปี พ.ศ. 2573 จากสาขาพลังงานและขนส่ง กระบวนการทางอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ และการจัดการของเสียในสาขากระบวนการทางอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ โดยในกระบวนการทางอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ ได้มีการกำหนดหนึ่งในมาตรการหลักเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกคือ “มาตรการทดแทนปูนเม็ด” ถือเป็นแนวทางดำเนินการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีศักยภาพสูง มีเทคโนโลยีการผลิตที่ทันสมัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [3]

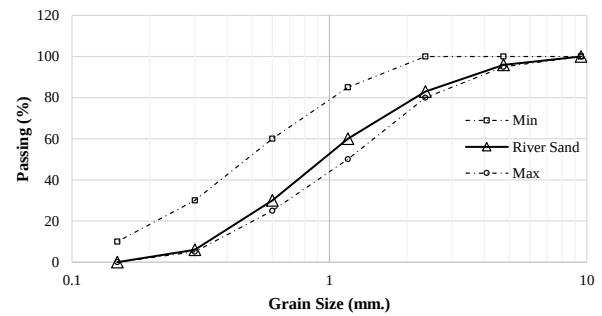
จากมาตรการทดแทนปูนเม็ดดังกล่าว ได้มีแนวคิดที่จะนำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมาใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก หมายถึงปูนซีเมนต์ที่ก่อตัวและแข็งตัวเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับน้ำ และมีความสามารถทำนองเดียวกันเมื่ออยู่ในน้ำ มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก. 2594 [4] ซึ่งอ้างอิงมาจาก ASTM C1157 [5] เน้นควบคุมที่คุณสมบัติและประสิทธิภาพ โดยกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ใช้หินปูนเป็นวัสดุทดแทนปูนเม็ด เนื่องจากความพร้อมด้านปริมาณสำรองและคุณภาพ จึงสามารถลดการเผาหินปูนที่เป็นวัตถุดิบหลัก ทำให้ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิตออกสู่ชั้นบรรยากาศได้อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ การใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 100 ตัน สามารถลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้ 5.2 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ เทียบเท่าการปลูกไม้พื้นเมืองเพื่อดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 547 ตัน ตามหลักเกณฑ์การเปรียบเทียบของสมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย [3]

ดังนั้น การโยธาธิการและผังเมืองจึงได้ร่วมกับสมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย (TCMA) สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (TCA) และสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (SIIT) ศึกษาสมบัติที่สำคัญของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทำการศึกษาลักษณะทางฟิสิกส์ของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ซึ่งผลจากการทดสอบดังกล่าวจะนำไปเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อใช้ข้อมูลอ้างอิงในการปรับปรุงแก้ไขมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยพ.1101-64 มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก และเพื่อให้สามารถใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมาใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้อย่างมั่นใจยิ่งขึ้น

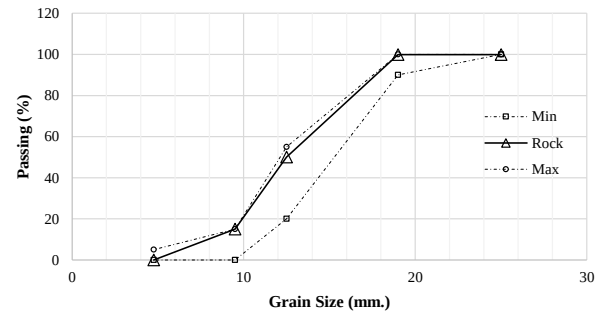
2. วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ประเภทใช้งานทั่วไป (General Use; GU) จากผู้ผลิต 6 ราย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement Type I; OPC) มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำ และมวลรวมหยาบใช้หินที่มีขนาด ¾ นิ้ว มีขนาดผลแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 1 ขนาดผลของมวลรวมละเอียด



รูปที่ 2 ขนาดผลของมวลรวมหยาบ

2.2 ส่วนผสมคอนกรีต

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีต ผสมโดยเครื่องผสม

ตัวอย่าง	ส่วนผสม (กิโลกรัม)				อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุ ประสาน	ค่าการ ยุบตัว (ซม.)
	ปูนซีเมนต์	ทราย	หิน	น้ำ		
OPC	320	820	1090	202	0.63	10±1
GU	320	820	1090	198	0.62	10±1

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของคอนกรีต ผสมมือ

ตัวอย่าง	ส่วนผสม (กิโลกรัม)				อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุ ประสาน	ค่าการ ยุบตัว (ซม.)
	ปูนซีเมนต์	ทราย	หิน	น้ำ		
OPC	300	830	1100	195	0.65	10±1
GU	300	830	1100	192	0.64	10±1

จากการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก โดยมีค่าการยุบตัวในช่วง 9-11 ซม. คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นส่วนผสมใช้ปริมาณน้ำน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยไม่ใช้สารลดน้ำ ส่งผลให้มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) น้อยกว่าเล็กน้อย ทั้งคอนกรีตที่ผสมด้วยเครื่องผสมและคอนกรีตที่ผสมด้วยมือ

2.3 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวทดสอบตาม มอก.2752 เล่ม 9 [6] โดยใช้ซีเมนต์เพสต์ที่มีความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) ตาม มอก.2752 เล่ม 8 [7] จากนั้นนำมาทดสอบระยะเวลาการก่อตัวโดยใช้เข็มไวเคต ระยะเวลาการก่อตัวช่วงต้นเข็มไวเคตจะมีระยะจมที่ 25 มม. จำนวน 3 ตัวอย่าง และระยะเวลาการก่อตัวปลายเข็มไวเคตจะไม่สามารถตกลงบนผิวซีเมนต์เพสต์ได้

2.4 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตทดสอบตาม มอก.409 [8] โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม.

สูง 300 มม. ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 3 7 28 และ 91 วัน โดยออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตให้มีค่าการยุบตัว (Slump) เท่ากับ 10 ± 1 ซม. แต่ไม่สามารถทดสอบที่อายุ 91 วัน เนื่องจากห้องปฏิบัติการปิดจากสถานการณ์โควิด 2019 จึงทดสอบจริงได้ที่อายุ 160 วัน โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีต 5 ตัวอย่าง นำมาหาค่าเฉลี่ย

2.4.1 กำลังอัดของคอนกรีตโดยเครื่องผสมกำหนดกำลังอัดประลัย 210 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ค.3) และปริมาณปูนซีเมนต์ 320 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.

2.4.2 กำลังอัดของคอนกรีตโดยการผสมมือ กำหนดกำลังอัดประลัย 180 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ค.2) และปริมาณปูนซีเมนต์ 300 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม.

2.5 การทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์

การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ (Resist Chloride Penetration Test, RCPT) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 [9] ใช้ตัวอย่างจากคอนกรีตผสมโดยเครื่อง ที่มีกำลังอัด 210 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน รูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. ที่อายุ 28 และ 160 วัน (ไม่สามารถทดสอบที่ 91 วันได้เช่นเดียวกับกำลังอัด) จำนวน 3 ตัวอย่างต่ออายุการทดสอบ โดยนำตัวอย่างมาตัดให้มีความสูง 50 มม. แล้วนำมาทดสอบกับอุปกรณ์ทดสอบ ซึ่งใช้กระแสไฟฟ้าในการทดสอบที่ 60 โวลต์ บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างทุก ๆ 30 นาที จนครบ 6 ชั่วโมง นำค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้มาคำนวณค่าความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตตามสมการ (1)

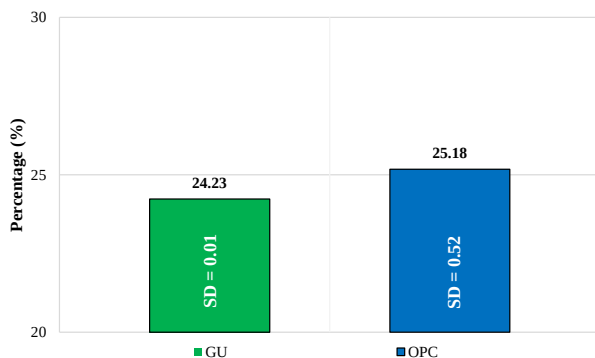
$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

โดยที่ Q คือ ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ และ I คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ มีหน่วยเป็นแอมแปร์

3. ผลการศึกษา

3.1 ระยะเวลาในการก่อตัว

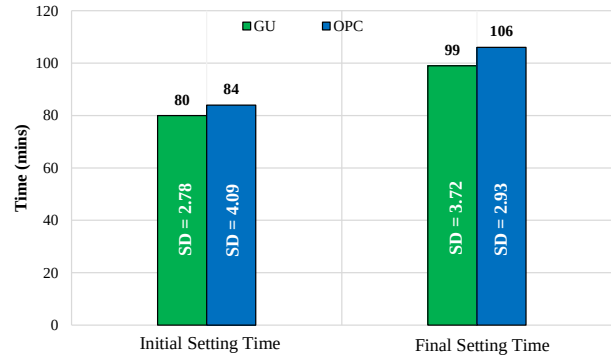
รูปที่ 3 แสดงความชื้นเหลวปกติ โดยซีเมนต์เฟสที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 มีค่าเท่ากับร้อยละ 24.23 และ 25.18 ตามลำดับ ซึ่งปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีความต้องการน้ำที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 สำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของซีเมนต์เฟสที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าที่ต่ำมาก เมื่อเทียบกับซีเมนต์เฟสที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1



รูปที่ 3 ความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) ของซีเมนต์เฟส

รูปที่ 4 แสดงระยะเวลาการก่อตัว โดยซีเมนต์เฟสที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีระยะเวลาการก่อตัวที่เร็วกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 เล็กน้อย เท่ากับ 80 และ 84 นาที ตามลำดับ ซึ่งระยะเวลาการก่อตัวดังกล่าวไม่เร็วกว่า 45 นาที ตามที่กำหนดไว้ใน มอก.15 [10] สำหรับ

ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย ซีเมนต์เฟสที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าที่เร็วกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 เล็กน้อย เท่ากับ 99 และ 106 นาที ตามลำดับ ซึ่งไม่ช้ากว่า 375 นาที ตามที่กำหนดไว้ใน มอก.15 [10] โดยซีเมนต์เฟสที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานใกล้เคียงกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



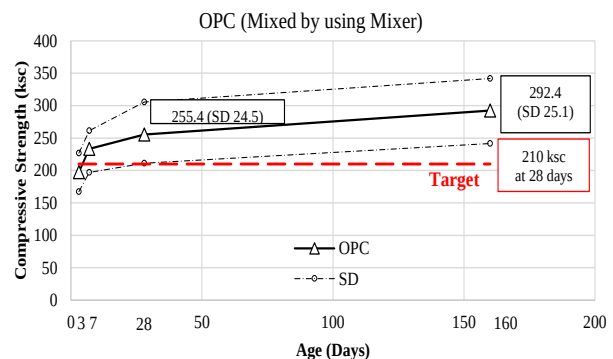
รูปที่ 4 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เฟส

3.2 กำลังอัดของคอนกรีต

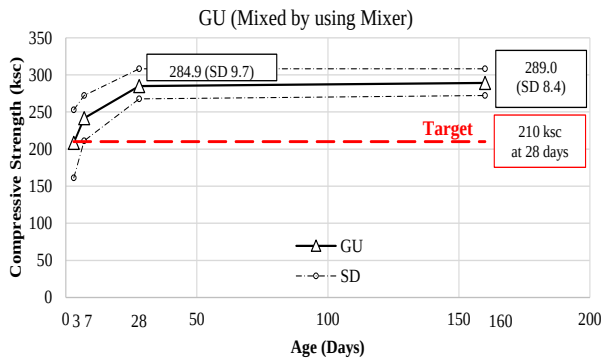
3.2.1 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมโดยเครื่องผสม

รูปที่ 5 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ที่ผสมโดยเครื่องผสม ที่อายุ 3 7 28 และ 160 วัน คอนกรีต OPC มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 255.4 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 และเพิ่มขึ้นเป็น 292.4 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 160 วัน โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 24.5 และ 25.1 ที่อายุ 28 และ 160 วัน ซึ่งคอนกรีต OPC มีกำลังอัดที่อายุ 7 วัน สูงกว่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ที่ 210 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน โดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ 320 กก.ต่อ ลบ.ม.

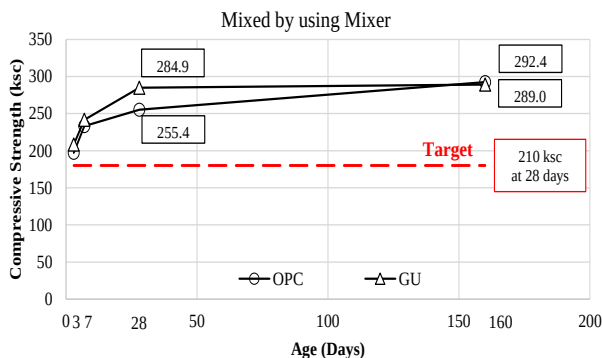
รูปที่ 6 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ที่ผสมโดยเครื่องผสม ที่อายุ 3 7 28 และ 160 วัน โดยคอนกรีต GU มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 284.9 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 289.0 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 160 วัน ตามลำดับ โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 9.7 และ 8.4 ที่อายุ 28 และ 160 วัน ซึ่งคอนกรีต GU มีกำลังอัดที่อายุ 7 วัน สูงกว่า 210 กก./ตร.ซม. ที่กำหนดไว้ที่อายุ 28 วัน เช่นเดียวกับคอนกรีต OPC และใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากัน ทั้งนี้ ยังมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำเนื่องจากกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกจากแหล่งที่ต่างกันมีค่าใกล้เคียงกันมาก



รูปที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ผสมโดยเครื่องผสม



รูปที่ 6 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกผสมโดยเครื่องผสม



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตผสมโดยเครื่องผสม

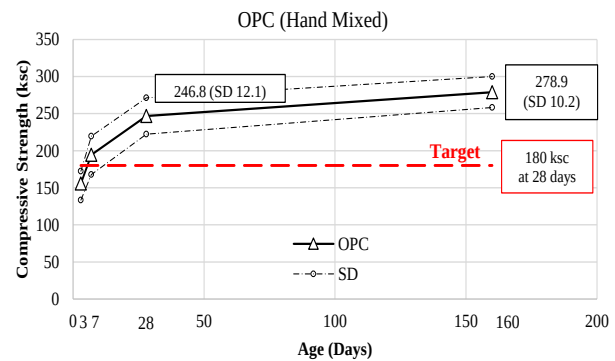
รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตผสมโดยเครื่องผสม พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีต OPC และคอนกรีต GU มีค่าใกล้เคียงกัน ในช่วงอายุต้นๆ 3 และ 7 วัน โดยค่ากำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 94 และ 99 ของเป้าหมายที่กำหนดไว้ (210 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน) ตามลำดับ ที่อายุ 3 วัน และคิดเป็นร้อยละ 111 และ 115 ของเป้าหมายที่กำหนดไว้ ตามลำดับ 7 วัน จากนั้นคอนกรีต GU มีกำลังอัดสูงกว่าที่อายุ 28 วัน คิดเป็นร้อยละ 136 ของเป้าหมายที่กำหนดไว้ และร้อยละ 122 ของเป้าหมายที่กำหนดไว้ สำหรับคอนกรีต OPC ส่วนหนึ่งเนื่องจากคอนกรีต GU มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำกว่าเล็กน้อย เมื่อควบคุมค่าการยุบตัวให้อยู่ในช่วงเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่มีการใช้ผงหินปูนแล้ว ทำให้มีความสามารถในการทำงาน (workability) เพิ่มขึ้น [11] และส่วนหนึ่งอาจมาจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีส่วนผสมอื่น ๆ ร้อยละ 10 เช่น ผงหินปูน เป็นต้น ซึ่งส่วนนี้อาจเป็นผลให้คอนกรีต GU มีการพัฒนากำลังอัดได้เร็วในช่วง 28 วัน จากงานวิจัยของ Soroka และ Setter [12-13] พบว่า การใช้ผงหินปูนจะเพิ่มปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) และสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ได้ ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น [14-15]

อย่างไรก็ตาม การพัฒนากำลังอัดที่รวดเร็วในช่วงต้นทำให้คอนกรีต GU มีกำลังอัดในช่วงปลาย ที่อายุ 160 วัน เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย คิดเป็นร้อยละ 138 ของเป้าหมายที่กำหนดไว้ และมีค่าน้อยกว่าคอนกรีต OPC เล็กน้อย คิดเป็นร้อยละ 139 ของเป้าหมายที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ คอนกรีต GU มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำมาก เมื่อเทียบกับคอนกรีต OPC

3.2.2 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมมือ

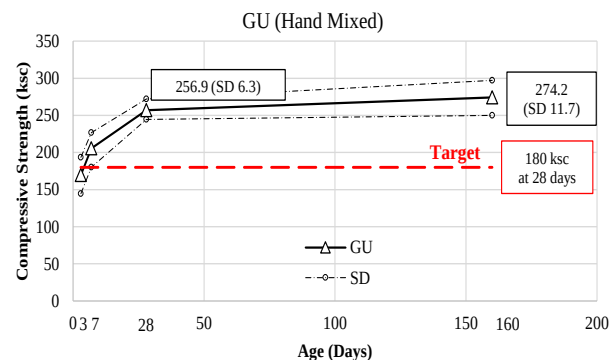
รูปที่ 8 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ที่ผสมมือ ที่อายุ 3 7 28 และ 160 วัน คอนกรีต OPC มีกำลังอัดเท่ากับ 246.8 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 และเพิ่มขึ้นเป็น 278.9 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 160 วัน โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 12.1 และ 10.2 ที่

อายุ 28 และ 160 วัน ตามลำดับ ซึ่งคอนกรีต OPC มีกำลังอัดที่อายุ 7 วัน สูงกว่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ที่ 180 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน โดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ 300 กก.ต่อ ลบ.ม.

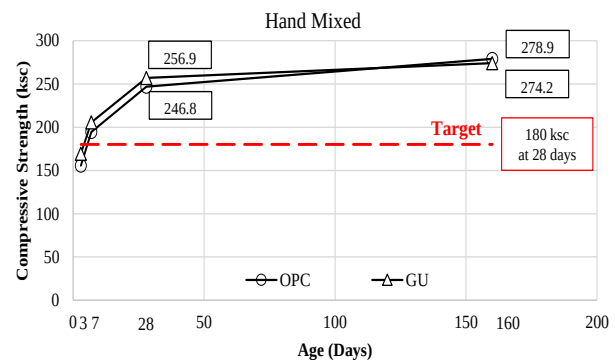


รูปที่ 8 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ผสมมือ

รูปที่ 9 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ที่ผสมมือ ที่อายุ 3 7 28 และ 160 วัน โดยคอนกรีต GU มีกำลังอัดเท่ากับ 256.9 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 และเพิ่มขึ้นเป็น 274.2 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 160 วัน ตามลำดับ ซึ่งคอนกรีต GU มีกำลังอัดที่อายุ 7 วัน สูงกว่า 180 กก./ตร.ซม. ที่กำหนดไว้ที่อายุ 28 วัน เช่นเดียวกับคอนกรีต OPC ทั้งนี้ ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกจากแหล่งที่ต่างกันมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง 6.3 ถึง 11.7



รูปที่ 9 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกผสมมือ



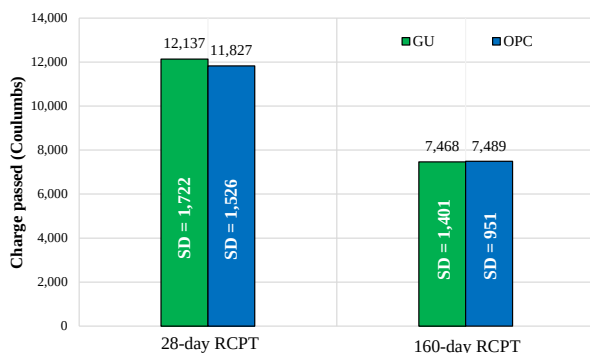
รูปที่ 10 การเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตผสมมือ

รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตผสมมือ พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีต OPC ต่ำกว่าคอนกรีต GU เล็กน้อยในช่วงอายุ 3 ถึง 28 วัน โดยคอนกรีต GU มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 256.9 กก./ตร.ซม. คิดเป็นร้อยละ 143 ของเป้าหมายที่กำหนดไว้ (180 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน) ขณะที่คอนกรีต OPC มีกำลังอัด 246.8 กก./ตร.ซม. คิดเป็นร้อยละ 137 ของเป้าหมายที่กำหนดไว้ ซึ่งคอนกรีต GU มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ

ประสานที่ต่ำกว่าเล็กน้อยที่ 0.64 และ 0.65 สำหรับคอนกรีต OPC เป็นไปเช่นเดียวกับคอนกรีต GU ที่ผสมด้วยเครื่องผสม และส่วนผสมอื่นในปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ส่งผลให้คอนกรีต GU มีกำลังอัดที่สูงกว่า อย่างไรก็ตาม คอนกรีต OPC มีการพัฒนา กำลังอัดไปยังอายุปลายที่สูงกว่าคอนกรีต GU ที่อายุ 160 วัน โดยมีค่ากำลังอัด 278.9 และ 274.2 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ โดยคิดเป็นร้อยละ 155 และ 152 ของเป้าหมายที่กำหนดไว้ตามลำดับ สำหรับคอนกรีต OPC และคอนกรีต GU นอกจากนี้ คอนกรีต GU มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำใกล้เคียงกับคอนกรีต OPC

3.3 การซึมผ่านของคลอไรด์

รูปที่ 11 แสดงการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีต โดยคอนกรีต OPC มีการซึมผ่านของคลอไรด์ของเท่ากับ 11,827 และ 7,489 คูลอมบ์ ที่อายุ 28 และ 160 วัน ตามลำดับ โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1,526 และ 951 ที่อายุ 28 และ 160 วัน ตามลำดับ ซึ่งคอนกรีต OPC มีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ดีขึ้น เมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น เนื่องจากคอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้น และมีความทึบน้ำมากขึ้น ทำให้คลอไรด์ซึมผ่านได้ยากขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 11 การซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีต

สำหรับคอนกรีต GU มีการซึมผ่านของคลอไรด์ของเท่ากับ 12,137 และ 7,468 คูลอมบ์ ที่อายุ 28 และ 160 วัน ตามลำดับ โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1,722 และ 1,401 ที่อายุ 28 และ 160 วัน ตามลำดับ ซึ่งคอนกรีต GU มีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ดีขึ้น เมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น เช่นเดียวกับคอนกรีต OPC

เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ (RCPT) ของคอนกรีต OPC กับคอนกรีต GU พบว่าคอนกรีต GU มีการซึมผ่านของคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีต OPC ที่อายุ 28 วัน ซึ่งไม่เป็นผลดี อย่างไรก็ตาม ที่คอนกรีตอายุ 160 วัน พบว่าคอนกรีต GU มีการซึมผ่านของคลอไรด์ที่ต่ำกว่าคอนกรีต OPC ซึ่งอาจเป็นเพราะส่วนผสมอื่นในปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น และทำให้ค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตลดลง สำหรับสภาวะการใช้งานจะเป็นเรื่องในระยะยาวสำหรับการเผชิญสภาวะคลอไรด์ ดังนั้น ผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ควรพิจารณาที่ผลของระยะยาวจะมีประโยชน์ที่สุด

4. สรุป

จากการศึกษาลักษณะทางฟิสิกส์ของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้แก่ ความชื้นเหลือปกติ ระยะเวลาการก่อตัว กำลังอัดของคอนกรีต และการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตสรุปได้ดังนี้

1) ความชื้นเหลือปกติ (Normal Consistency) ของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1

2) ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Times) ของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกจะมีระยะเวลาที่เร็วกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 เล็กน้อย ทั้งระยะเวลาการก่อตัวต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 15 [10]

3) กำลังอัดของคอนกรีตทั้งหมด ที่อายุ 28 วัน มีกำลังสูงกว่าที่กำหนดทั้งคอนกรีตผสมโดยเครื่องและผสมมือ โดยคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีความต้องการน้ำที่น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 แต่ให้ค่าการยุบตัวที่เท่ากัน

4) กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นส่วนผสมมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ที่อายุ 28 วัน สำหรับการผสมโดยเครื่องผสม มีกำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 136 ของเป้าหมายที่กำหนดไว้ (210 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน) และสำหรับการผสมมือ มีกำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 143 ของเป้าหมายที่กำหนดไว้ (180 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน) อย่างไรก็ตาม กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 สำหรับการผสมโดยเครื่องผสม มีกำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 138 และ 139 ของเป้าหมายที่กำหนดไว้ (210 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน) ตามลำดับ และสำหรับการผสมมือ มีกำลังอัดคิดเป็นร้อยละ 152 และ 155 ของเป้าหมายที่กำหนดไว้ (180 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน) ตามลำดับ โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1

5) การซึมผ่านของคลอไรด์ (RCPT) ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นส่วนผสม มีค่าที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 เล็กน้อย ที่อายุ 28 วัน แต่ในทางกลับกัน ที่คอนกรีตอายุ 160 วัน การซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1

5. การขับเคลื่อนมาตรการลดก๊าซเรือนกระจกโดยการใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

จากผลการทดสอบครั้งนี้สรุปได้ว่าปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกประเภทใช้งานทั่วไปสามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ได้ โดยได้มีการนำข้อมูลดังกล่าวไปประโยชน์ ดังนี้

1) กรมโยธาธิการและผังเมืองได้ดำเนินการปรับปรุงแก้ไขมาตรฐานกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร มยผ. 1101 – 64 ถึง มยผ. 1106 – 64 [16] ซึ่ง มยผ. 1101 – 64 มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็กได้มีการเพิ่มเติมปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกให้เป็นปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานก่อสร้างโครงสร้างได้

2) กรมโยธาธิการและผังเมืองได้มีการแจ้งไปยังหน่วยงานของกรมโยธาธิการและผังเมือง ให้ทราบถึงการปรับปรุง มยผ. 1101-64 ถึง มยผ. 1106-64 แล้วเสร็จ และแจ้งไปยังหน่วยงานของกรมโยธาธิการและผังเมือง และหน่วยงานอื่นของรัฐในทุกจังหวัด พิจารณานำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมาใช้ในงานก่อสร้างมากขึ้น โดยให้พิจารณากำหนดเพิ่มเติมในรายการประกอบแบบก่อสร้างให้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่งที่ใช้ในงานก่อสร้างโครงสร้าง รวมถึงพิจารณาเลือกใช้ผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นส่วนผสมเป็นวัสดุก่อสร้างหลัก เพื่อเป็นการร่วมมือในมาตรการผลักดันการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย

4) กรมโยธาธิการและผังเมืองได้พิจารณาแล้วเห็นว่า เพื่อเป็นการผลักดันการใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในงานก่อสร้างให้เป็นรูปธรรมมากยิ่งขึ้น จึงขอความร่วมมือสมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทยแจ้งไปยังผู้ผลิต

ปูนซีเมนต์ที่เป็นสมาชิกของสมาคมให้ติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์ ณ โรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จที่มีการใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นส่วนผสมในคอนกรีต เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับผู้ปฏิบัติงานก่อสร้างและเป็นการประชาสัมพันธ์ให้ประชาชนทั่วไปได้รับทราบ

5) กรมโยธาธิการและผังเมืองร่วมกับสมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทยได้จัดทำคู่มือประชาชน ลดโลกร้อนด้วยปูนลดโลกร้อน (ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก) ในรูปแบบและภาษาที่เข้าใจง่าย เพื่อสร้างการรับรู้เกี่ยวกับการใช้ปูนซีเมนต์ลดโลกร้อน (ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก) ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เพื่อให้ประชาชนได้มีความรู้ความเข้าใจ และได้เผยแพร่คู่มือดังกล่าวไปยังหน่วยงานของกรมโยธาธิการและผังเมือง และกรมส่งเสริมการปกครองท้องถิ่นได้เผยแพร่ต่อไปยังองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

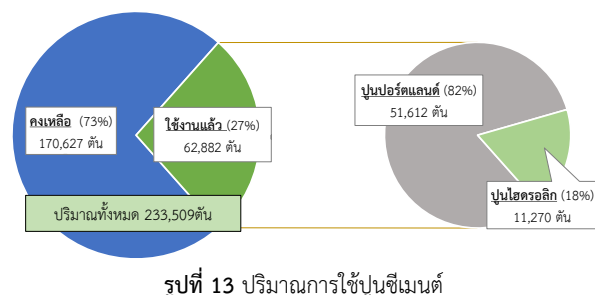
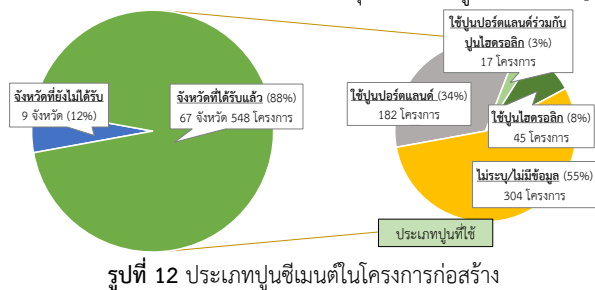
6) กรมโยธาธิการและผังเมืองได้ขอให้หน่วยงานของกรมโยธาธิการและผังเมืองที่เกี่ยวข้องกับการใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ดำเนินการตามนโยบายการนำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมาใช้งานก่อสร้าง และรายงานข้อมูลการใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

7) กรมโยธาธิการและผังเมืองได้รวบรวมรายงานข้อมูลการใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ณ วันที่ 1 มีนาคม 2566 สรุปได้ดังนี้

7.1) กรมโยธาธิการและผังเมืองมีโครงการก่อสร้าง รวม 548 โครงการ โดยแบ่งเป็นโครงการก่อสร้างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเดียว จำนวน 182 โครงการ โครงการก่อสร้างที่มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร่วมกับปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก จำนวน 17 โครงการ โครงการก่อสร้างที่มีการใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเพียงอย่างเดียว จำนวน 45 โครงการ และโครงการที่ไม่ได้ระบุชนิดปูนซีเมนต์ที่ใช้จำนวน 304 โครงการ ดังแสดงในรูปที่ 12

7.2) ปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ทั้งหมด รวม 78,165 ตัน เป็นปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 66,895 ตัน และปริมาณปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 11,270 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 13

7.3) จากปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก จำนวน 11,270 ตัน คิดเป็นปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่ลดได้ 586 ตัน CO₂ ซึ่งเทียบเท่ากับการปลูกต้นไม้ 61,688 ต้น หรือคิดเป็นพื้นที่ป่าประมาณ 616 ไร่ ตามหลักเกณฑ์การเปรียบเทียบของสมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย [3]



กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำบทความนี้ขอขอบคุณ คณะทำงานศึกษานำคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นส่วนผสมมาใช้งานก่อสร้างของกรมโยธาธิการและผังเมือง ซึ่งเป็นการศึกษาร่วมกันของกรมโยธาธิการและผังเมือง สมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย (TCMA) สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (TCA) และสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (SIIT)

เอกสารอ้างอิง

- [1] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2558). *ความรู้ด้านก๊าซเรือนกระจก*. สืบค้น 15 มีนาคม 2566, จาก <http://www.tgo.or.th/2020/index.php/th/page/ปรากฏการณ์ก๊าซเรือนกระจก-319>.
- [2] นางสาวศิริพร วิริยะตั้งสกุล (2563). *รายงานผลการศึกษากำหนดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Threshold)* สืบค้น 15 มีนาคม 2566, จาก <https://ghgredution.tgo.or.th/th/download-tver/68-tver-publications/1363-threshold.html>.
- [3] สมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย (2565). *มาตรการทดแทนปูนเม็ด* สืบค้น 15 มีนาคม 2566, จาก https://www.thaicma.or.th/th/substitution/cement_industry/clinker-substitution#9.
- [4] มอก. 2594 (2556). *ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก. ส่วนงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม*.
- [5] ASTM C1157 (2008). *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [6] มอก.2752 เล่ม 9 (2560). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. วิธีทดสอบปูนซีเมนต์. เล่ม 9 วิธีทดสอบระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์ไฮดรอลิกเพสต์. โดยใช้เข็มแบบไวแคต. ส่วนงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม*.
- [7] มอก.2752 เล่ม 8 (2560). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. วิธีทดสอบปูนซีเมนต์ เล่ม 8 วิธีทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์ไฮดรอลิกเพสต์. ส่วนงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม*.
- [8] มอก.409 (2560). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. วิธีทดสอบความต้านแรงอัดของแท่งคอนกรีต. ส่วนงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม*.
- [9] ASTM C1202 (2019). *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [10] มอก.15 (2562). *ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. ส่วนงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม*.
- [11] Joudi, B.I., Lecomteb, A., Ouezdoua, M.B. and Achourc. T. (2012). Use of limestone sands and fillers in concrete without superplasticizer. *Cement and Concrete Composites*, 34 (6), pp. 771–780.
- [12] Soroka, I. and Setter, N. (1977). The effect of fillers on strength of cement mortars. *Cement and Concrete Research*. 7 (4), pp. 449–456.
- [13] Soroka, I. and Setter, N. (1976). Calcareous fillers and the compressive strength of Portland cement. *Cement and Concrete Research*. 6 (3), pp. 367–376.

- [14] Kenai S., Menadi, B. and Ghrici, M. (2006). Performance of limestone cement mortar. *8th CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology*, 2006, pp. 39.
- [15] Yasar, E. Erdogan, Y. and Kılı, A. (2004). Effect of limestone aggregate type and water–cement ratio on concrete strength. *Materials Letters*. 58 (5), pp. 772–777.
- [16] มยผ.1101 (2564). มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก. กรมโยธาธิการและผังเมือง.