การศึกษาผลของการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ชนิดของปูนซีเมนต์และวัสดุประสานร่วมต่างกัน

ธีรติ ศรีจันทร์[1] บุรฉัตร ฉัตรวีระ[2*]
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120
พงษ์ศักดิ์ โชคทวีกาญจน์[3] และ สมนึก ตั้งเติมสิริกุล[4]
สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลของการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานร่วม ปูนซีเมนต์ - เถ้าลอย, ปูนซีเมนต์ - ผงฝุ่นหินปูน และ ปูนซีเมนต์ - เถ้าลอย - ผงฝุ่นหินปูน การทดสอบได้ใช้ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1, 3 และ 5 ตามมาตรฐาน ASTM C150 เพื่อศึกษาผลของความละเอียด และองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกันของปูนซีเมนต์ และใช้เถ้าลอย ประเภท 2ก และ 2ข ตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1014 เพื่อศึกษาผลของชนิดของเถ้าลอย ผงฝุ่นหินปูนที่ใช้ในการทดสอบมีความละเอียด 5 ไมครอน สภาพการบ่มที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ การบ่มด้วยน้ำ และบ่มในอากาศ กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานโดยน้ำหนัก (w/b) เท่ากับ 0.35 และ 0.55 ในการศึกษาได้ประเมินอิทธิพลของการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้ดัชนีวัดผลต่อการบ่ม (Curing Sensitivity Index, CSI) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความแตกต่างด้านกำลังอัดของตัวอย่างที่บ่มในน้ำกับบ่มในอากาศ เทียบกับกำลังอัดของตัวอย่างที่บ่มในน้ำ ในกรณีที่คอนกรีตมีค่า CSI สูง แสดงว่าการบ่มมีอิทธิพลต่อกำลังอัดของคอนกรีตนั้นๆ สูง จากการศึกษาพบว่า การบ่มมีอิทธิพลอย่างมากต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต คอนกรีตที่ได้รับการบ่มน้ำจะมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่บ่มในอากาศ เมื่อเปรียบเทียบผลตามชนิดของปูนซีเมนต์ พบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 จะมีผลต่อการบ่มมากที่สุด ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 3 มีค่า CSI ลดลงตามลำดับ การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตทำให้ CSI สูงขึ้น โดยเถ้าลอยประเภท 2ก จะมี CSI มากกว่าเถ้าลอยประเภท 2ข การใช้ผงฝุ่นหินปูนในคอนกรีตสามารถลด CSI ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานร่วมปูนซีเมนต์ - เถ้าลอยได้

คำสำคัญ : วัสดุประสานร่วม / อิทธิพลของการบ่ม / กำลังอัดของคอนกรีต / เถ้าลอย / ผงฝุ่นหินปูน

---

* *Corresponding author : cburacha@engr.tu.ac.th*

1 *นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

2 *รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

3 *นักวิจัย ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา*

4 *ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา*

A Study on Curing Sensitivity of Concrete with Different Cement Types and Mineral Admixtures

Theerati Srichan[1] Burachat Chatveera[2*]
Thammasat University (Rangsit Campus), Klong 1, Klong Luang, Pathum Thani 12120
Pongsak Choktaweekarn[3] and Somnuk Tangtermsirikul[4]
Sirindhon International Institute of Technology, Klong 1, Klong Luang, Pathum Thani 12120

Abstract

This research is emphasized on the effect of curing sensitivity on compressive strength of concrete with different types of cement and mineral admixtures. Concretes with binary and ternary binders of Portland cement, fly ash and limestone powder were produced to investigate their curing sensitivity by considering compressive strength as the indicator. For cement concrete, ordinary Portland cement types 1, 3 and 5 conformed to ASTM C150 were used to study the effect of fineness and chemical composition of cement. Two types of fly ash which conform to EIT 1014 type 2a (CaO < 10%) and type 2b (CaO > 10%) were used to investigate the effect of fly ash types. Two series of concrete with water to binder ratios by weight (w/b) of 0.35 and 0.55 were produced for compressive strength. The specimens were subjected to two curing conditions which are continuously water-cured and continuously air-cured. The curing sensitivity of concrete on compressive strength was evaluated by using the curing sensitivity index (CSI) which is the percentage difference between compressive strength of concrete that is continuously water-cured and that of continuously air-cured concrete. The higher curing sensitivity index means concrete is more sensitive to curing. It was found from the test results that in case of cement concrete, the curing sensitivity of concrete with Portland cement type 3 was lowest compared to the other types of cement while concrete with Portland cement type 5 was the most sensitive to curing. Cement-fly ash concrete is more sensitive to curing than the cement concrete. The curing sensitivity of concrete with fly ash type 2a was higher than concrete with fly ash type 2b. The use of limestone powder reduced the curing sensitivity of cement only and cement-fly ash concrete.

Keywords : Multiple Binders / Sensitive to Curing / Compressive Strength / Fly Ash / Limestone Powder

---

* *Corresponding author : cburacha@engr.tu.ac.th*
1 *Master Degree Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*
2 *Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*
3 *Researcher, Construction & Maintenance Technology Research Center.*
4 *Professor, School of Civil Engineering and Technology.*

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีการใช้งานมาอย่างยาวนาน อย่างไรก็ตามการก่อสร้างในปัจจุบันก็ยังคงพบปัญหาหลายๆ ด้านทั้งด้านคุณสมบัติทางกล และด้านความคงทน ปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตคือ ปัญหาอันสืบเนื่องจากการบ่มคอนกรีต เช่นปัญหาเรื่องการพัฒนากำลังอัดที่ไม่สมบูรณ์ และปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการรับแรง และอายุการใช้งานของโครงสร้างลดลง จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มด้วยความชื้นเทียบกับการบ่มในอากาศจะมีค่ากำลังอัดลดลง 17-22% [1] Wood [2] พบว่าหากทำการบ่มชื้นอย่างต่อเนื่องจะทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นจนถึงอายุ 20 ปี Baris Ozer และ M.Hulusi Ozkul [3] พบว่าคอนกรีตที่ใช้ปอซโซลานซีเมนต์จะต้องบ่มอย่างน้อย 14 วัน จึงจะมีกำลังอัดเทียบเท่ากับคอนกรีตที่ไม่ใช้ปอซโซลาน

มาตรฐาน ACI 308 [4] ได้กำหนดการบ่มน้ำของคอนกรีตอย่างน้อยที่อายุ 7 วัน สำหรับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภท 3 ควรบ่มชื้นคอนกรีตอย่างน้อย 3 วัน ว.ส.ท. 1014 [5] ได้กำหนดให้ระยะเวลาการบ่มคอนกรีตขั้นต่ำสำหรับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย โดยแบ่งตามชนิด และปริมาณการใช้เถ้าลอย โดยกำหนดให้ระยะเวลาการบ่มคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมนานกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าลอย และต้องบ่มคอนกรีตให้นานขึ้นเมื่อใช้เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น

แม้ว่าจะมีข้อกำหนดด้านการบ่มแล้ว แต่ในการก่อสร้างจริงพบว่า การบ่มคอนกรีตยังคงไม่ได้มาตรฐาน ทั้งนี้ปัญหาส่วนหนึ่งเกิดจากสภาพอากาศของประเทศไทยซึ่งเป็นเมืองร้อน จึงทำให้การบ่มทำได้ยากและมีประสิทธิภาพต่ำ คอนกรีตบางประเภท เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ต่ำ, คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง (high strength concrete), คอนกรีตไหลเข้าแบบง่าย (self-compacting concrete) ซึ่งมีความทึบน้ำสูง และคอนกรีตหลา (mass concrete) ซึ่งเป็นคอนกรีตสำหรับโครงสร้างซึ่งมีขนาดใหญ่ น้ำสำหรับบ่มคอนกรีต สามารถซึมเข้าสู่บริเวณด้านในของคอนกรีตได้น้อย ทำให้การบ่มคอนกรีตไม่ทั่วถึง ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการดีหากสามารถลดอิทธิพลของการบ่มโดยการพัฒนาคอนกรีตให้มีผลกระทบเนื่องจากการบ่มต่ำลง โดยการใช้วัสดุประสานร่วมที่เหมาะสม

ประกอบกับในปัจจุบันได้มีการนำเอาวัสดุประสานหลายประเภท เช่นเถ้าลอย และผงฝุ่นหินปูนมาใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ในคอนกรีตเพื่อลดต้นทุน และช่วยลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งคอนกรีตที่ผลิตจากชนิดของวัสดุประสานที่ต่างกันอาจต้องการระยะเวลาในการบ่มที่ต่างกันด้วย ซึ่งมาตรฐานการบ่มในปัจจุบันยังไม่ครอบคลุมถึงวัสดุประสานเหล่านี้

ด้วยเหตุผลเหล่านี้ งานวิจัยจึงมุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของการบ่มต่อกำลังรับแรงอัดคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานร่วมปูนซีเมนต์, เถ้าลอย และผงฝุ่นหิน ข้อมูลเหล่านี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาคอนกรีตที่มีผลต่อการบ่มต่ำต่อไปในอนาคต

2. วัสดุและการทดสอบ

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 3 และ 5 มาตรฐาน ASTM C150 [6] โดยมีสัญลักษณ์ C1, C3 และ C5 ตามลำดับ เถ้าลอยที่ใช้แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภท 2ก และ 2ข ตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1014 โดยมีสัญลักษณ์ FAA และ FAB ตามลำดับ ผงฝุ่นหิน (LP) ใช้ผงฝุ่นหินที่มีขนาด 5 ไมครอน องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์แสดงในตารางที่ 1 สำหรับเถ้าลอยและผงฝุ่นหินปูนแสดงในตารางที่ 2 มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ใช้ได้แก่ ทรายแม่น้ำ และหินปูน โดยค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 และ 2.69 ตามลำดับ

2.2 การทดสอบ และส่วนผสม

การทดสอบกำลังอัดใช้ก้อนตัวอย่างแบบลูกบาศก์ขนาด 15 ซ.ม. แบ่งการบ่มออกเป็น 2 แบบ คือบ่มน้ำและบ่มในอากาศ (ไม่มีการบ่ม) ทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 และ 91 วัน อุณหภูมิน้ำที่ใช้บ่มอยู่ระหว่าง 26±2°C อุณหภูมิอากาศอยู่ระหว่าง 28±2°C และมีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศประมาณ 50±3% ในการทดลองนี้ใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ

0.35 และ 0.55 กำหนดให้ปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างในมวลรวม (γ) เท่ากับ 1.4 โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 กลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 ศึกษาผลของความละเอียด และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 3 มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ความละเอียดของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3 สูงกว่าประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 มีความละเอียดใกล้เคียงกันแต่มีองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน ดังนั้นในกลุ่มนี้จะศึกษาผลของความละเอียดของปูนซีเมนต์ โดยศึกษาเปรียบเทียบคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 กับ 3 (ส่วนผสมที่ 1 และ 2 ในตารางที่ 3 และ 4) และ ศึกษาผลของความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ โดยศึกษาเปรียบเทียบคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 กับ 5 (ส่วนผสมที่ 1 และ 3 ในตารางที่ 3 และ 4)

กลุ่มที่ 2 ศึกษาผลของปริมาณเถ้าลอยที่ต่างกัน โดยใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 50 (ส่วนผสมที่ 1, 5 และ 8 ในตารางที่ 3 และ 4)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1, 3 และ 5

รายการ	ปูนซีเมนต์ประเภท 1	ปูนซีเมนต์ประเภท 3	ปูนซีเมนต์ประเภท 5
ความละเอียด (cm^2/g)	3,480	4,500	3,760
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	3.22	3.13
C_3S (%)	64.12	63.77	58.41
C_2S (%)	9.63	11.41	18.73
C_3A (%)	6.15	6.29	2.92
C_4AF (%)	11.34	10.09	13.19

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและผงฝุ่นหิน

รายการ	เถ้าลอย FAA	เถ้าลอย FAB	ผงฝุ่นหินปูน
SiO_2 (%)	65.15	39.40	0.42
Al_2O_3 (%)	22.06	17.96	0.11
Fe_2O_3 (%)	4.17	12.92	0.08
CaO (%)	1.25	19.19	55.23
SO_3 (%)	0.18	3.03	0.01
LOI (%)	3.78	0.17	44.16
ความละเอียด (cm^2/g)	2,860	2,836	6,874
ความถ่วงจำเพาะ	2.24	2.29	2.69

ตารางที่ 3 ส่วนผสมคอนกรีตต่อลูกบาศก์เมตรสำหรับ w/b = 0.35

ลำดับที่	ส่วนผสมคอนกรีต	ปูนซีเมนต์ (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	ผงฝุ่นหิน (กก.)	น้ำ (กก.)	หิน (กก.)	ทราย (กก.)
1	C1FA0LP0W35	467	0	0	164	1040	761
2	C3FA0LP0W35	472	0	0	165	1040	761
3	C5FA0LP0W35	467	0	0	164	1040	761
4	C1FA0LP10W35	417	0	46	162	1040	761
5	C1FAB30LP0W35	311	133	0	155	1040	761
6	C1FAB20LP10W35	313	90	45	157	1040	761
7	C1FAA50LP0W35	213	213	0	149	1040	761
8	C1FAB50LP0W35	215	215	0	150	1040	761

กลุ่มที่ 3 ศึกษาผลของชนิดของเถ้าลอย 2 ประเภท ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเถ้าลอย ประเภท 2ก (FAA) จะมีปริมาณ SiO_2 ที่สูง แต่มีปริมาณ CaO ต่ำกว่าเถ้าลอยประเภท 2ข (FAB) การทดสอบในกลุ่มนี้ได้กำหนดให้ใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานโดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 50 (ส่วนผสมที่ 1, 7 และ 8 ในตารางที่ 3)

กลุ่มที่ 4 ศึกษาผลการบ่มต่อคอนกรีตที่ใช้ผงฝุ่นหินปูน สำหรับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน จะใช้ผงฝุ่นหินปูนแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 10 (ส่วนผสมที่ 1 และ 4 ในตารางที่ 3 และ 4) สำหรับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยจะใช้ผงฝุ่นหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานโดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 10 และเถ้าลอยร้อยละ 20 (ส่วนผสมที่ 1 และ 6 ในตารางที่ 3 และ 4)

ตารางที่ 4 ส่วนผสมคอนกรีตต่อลูกบาศก์เมตรสำหรับ w/b = 0.55

ลำดับที่	ส่วนผสมคอนกรีต	ปูนซีเมนต์ (กก.)	เถ้าลอย (กก.)	ผงฝุ่นหิน (กก.)	น้ำ (กก.)	หิน (กก.)	ทราย (กก.)
1	C1FA0LP0W55	360	0	0	198	1040	761
2	C3FA0LP0W55	363	0	0	199	1040	761
3	C5FA0LP0W55	359	0	0	198	1040	761
4	C1FA0LP10W55	322	0	36	197	1040	761
5	C1FAB30LP0W55	242	104	0	190	1040	761
6	C1FAB20LP10W55	244	70	35	191	1040	761
7	C1FAA50LP10W55	167	167	0	184	1040	761
8	C1FAB50LP0W55	168	168	0	185	1040	761

3. ผลการทดสอบและวิจารณ์

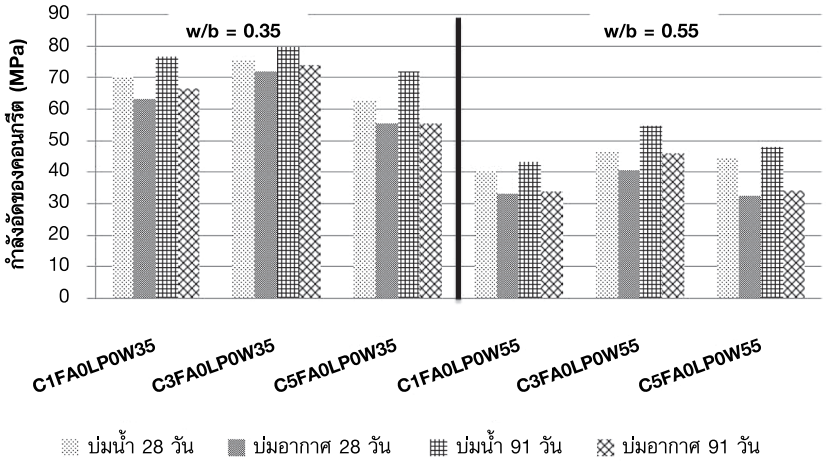
3.1 ผลการทดสอบกำลังอัด

จากผลการทดสอบกำลังอัดแสดงในรูปที่ 1 ถึง 4 ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ในแต่จะจุด ได้มาจากค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบกำลังอัด 3 ตัวอย่าง โดยค่ากำลังอัดของแต่ละตัวอย่างมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 5% จากค่าเฉลี่ย จากผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่บ่มในอากาศ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการบ่มมีผลอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีต การวิจารณ์ในแต่ละกลุ่มมีดังนี้

3.1.1 กลุ่มที่ 1 ผลของความละเอียด และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

ผลตามชนิดของปูนซีเมนต์แสดงในรูปที่ 1 โดยการเปรียบเทียบผลของความละเอียดของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 กับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3 ผลการทดสอบที่อายุ 28 และ 91 วัน แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะมีค่ากำลังอัดมากกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ทั้ง w/c เท่ากับ 0.35 และ 0.55 เนื่องจากปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3 มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้เร็วกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

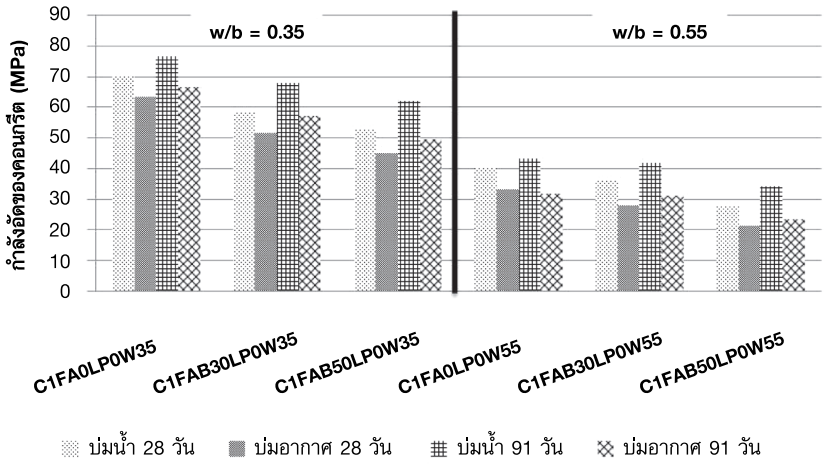
ส่วนการเปรียบเทียบผลขององค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 กับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ผลการทดสอบที่อายุ 28 และ 91 วัน แสดงให้เห็นว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 จะมีกำลังอัดต่ำกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ทั้ง w/b เท่ากับ 0.35 และ 0.55 เนื่องจากปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มี C_3S และ C_3A น้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 อย่างไรก็ตามการพัฒนากำลังอัดในระยะยาว (ในที่นี้ได้แก่การพัฒนากำลังอัดจากอายุ 28 ถึง 91 วัน) ของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 จะมากกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ดังเห็นได้จากกำลังพัฒนาอัดของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 จากอายุ 28 ถึง 91 วัน สูงขึ้น 9.26% และ 4.96% ของ w/b เท่ากับ 0.35 และ 0.55 ตามลำดับ แต่ในขณะที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 สูงขึ้น 15.36% และ 9.05% ของ w/b เท่ากับ 0.35 และ 0.55 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มี C_2S ในปริมาณมากจึงส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดขึ้นได้ช้ากว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แต่จะทำปฏิกิริยาได้นานกว่า ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 น้อยกว่า ประเภทที่ 1 อย่างไรก็ตามปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 จึงทำปฏิกิริยาได้ในระยะยาว ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดจากอายุ 28 ถึง 91 วันของคอนกรีตที่บ่มน้ำ สูงกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1



รูปที่ 1 ผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตในกลุ่มที่ 1

3.1.2 กลุ่มที่ 2 ศึกษาผลของปริมาณเถ้าลอย

ผลทดสอบกำลังอัดของการทดสอบในกลุ่มที่ 2 แสดงในรูปที่ 2 ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้นจะมีกำลังอัดลดลงทั้ง w/b เท่ากับ 0.35 และ 0.55 ซึ่งการใช้เถ้าลอยจะทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ด้วยเหตุนี้ที่อายุต้นกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจึงมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต้นมีค่าน้อยลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเถ้าลอย อย่างไรก็ตามการพัฒนากำลังอัดที่ใช้เถ้าลอยจะมีมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ดังเห็นได้จากการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนจากอายุ 28 ถึง 91 วัน สูงขึ้น 9.26% และ 4.96% ของ w/b เท่ากับ 0.35 และ 0.55 ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 มีกำลังอัดเพิ่มขึ้น 16.61% และ 15.75% ของ w/b เท่ากับ 0.35 และ 0.55 ตามลำดับ และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 50 มีกำลังอัดเพิ่มขึ้น 16.95% และ 17.56% ของ w/b เท่ากับ 0.35 และ 0.55 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงอายุยาว ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยในสถานะบ่มน้ำ จะมีการพัฒนากำลังอัดจากอายุ 28 วัน จนถึงอายุ 91 วันสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน



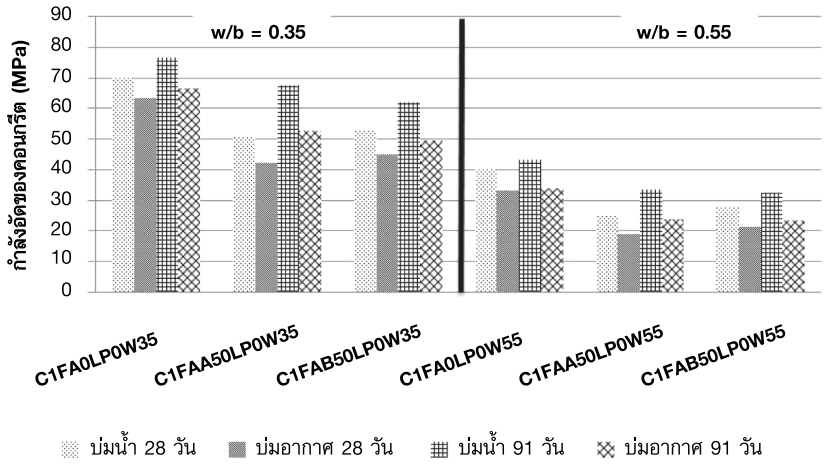
รูปที่ 2 ผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตในกลุ่มที่ 2

3.1.3 กลุ่มที่ 3 ศึกษาผลของชนิดของเถ้าลอยที่ต่างกัน

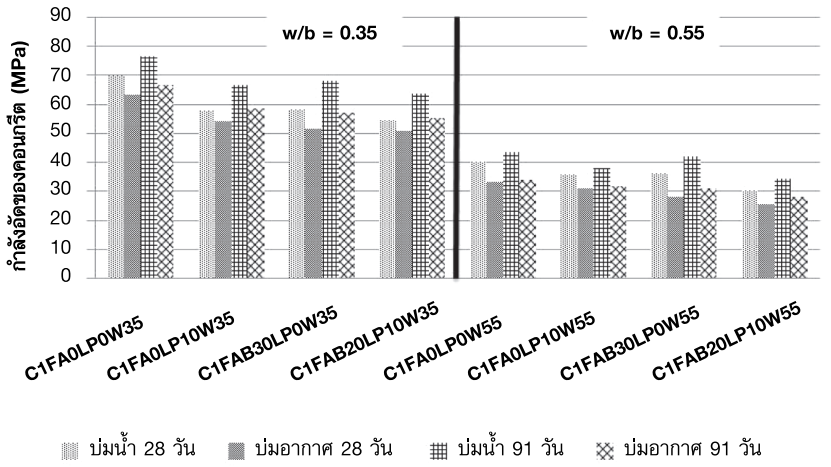
ผลของเถ้าลอยที่ต่างกัน 2 ประเภทแสดงในรูปที่ 3 ผลทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 และ 91 วัน แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย FAB มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย FAA ซึ่งอาจเป็นผลจากปริมาณ CaO ของเถ้าลอย FAB ที่มากกว่าเถ้าลอย FAA จึงทำให้เถ้าลอย FAB เกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าเถ้าลอย FAA อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเถ้าลอย FAA มีปริมาณ SiO_2 ที่มากกว่าเถ้าลอย FAB จึงเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากกว่า จึงทำให้การพัฒนากำลังอัดจากอายุ 28 ถึง 91 วัน ของคอนกรีตที่บ่มน้ำมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย FAB และ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

3.1.4 กลุ่มที่ 4 ศึกษาผลการบ่มต่อคอนกรีตที่ใช้ผงฝุ่นหินปูน

ผลการบ่มต่อคอนกรีตที่ใช้ผงฝุ่นหินปูนแสดงในรูปที่ 4 ผลทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 และ 91 วัน แสดงให้เห็นว่าการใช้ผงฝุ่นหินปูนแทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงในทุกๆ ส่วนผสม อย่างไรก็ตามกำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในน้ำเทียบกับบ่มในอากาศมีค่าต่างกันน้อย เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใช้ผงฝุ่นหินปูน



รูปที่ 3 ผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตในกลุ่มที่ 3



รูปที่ 4 ผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตในกลุ่มที่ 4

3.2 อิทธิพลของการบ่มของคอนกรีต (CSI)

จากผลการทดสอบกำลังอัดที่ได้ในหัวข้อ 3.1 สามารถนำมาคำนวณดัชนีวัดอิทธิพลของการบ่มได้ดังแสดงในสมการที่ 1 ในกรณีที่ CSI มีค่าสูงหมายความว่าการบ่มมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตสูง การวิจารณ์ผล CSI ของการทดสอบในแต่ละกลุ่มแสดงในหัวข้อ 3.2.1 ถึง 3.2.4

$$CSI = \left(\frac{f_c'(WC) - f_c'(AC)}{f_c'(WC)} \right) \times 100 \qquad \textbf{(1)}$$

โดยที่ CSI คือ ดัชนีวัดผลการบ่ม (%)

$f_c'(WC)$ คือกำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มน้ำ (MPa)

$f_c'(AC)$ คือกำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มในอากาศ (MPa)

3.2.1 กลุ่มที่ 1 ผลของความละเอียด และองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

รูปที่ 5 แสดงค่า CSI ของการทดสอบในกลุ่ม

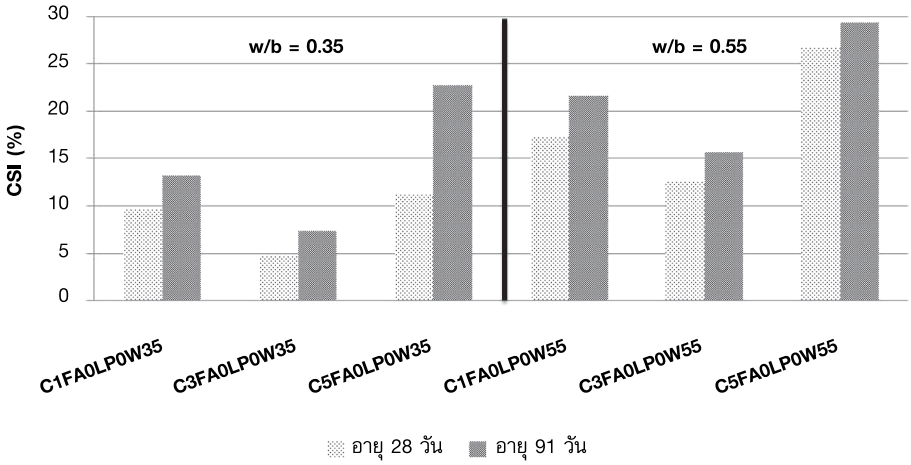
ที่ 1 ที่อายุ 28 และ 91 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3 จะมี CSI ต่ำที่สุด ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีค่า CSI สูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3 ทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอายุต้น ดังนั้นปูนซีเมนต์ส่วนมากจึงทำปฏิกิริยาไปแล้วตั้งแต่อายุต้น ทำให้ความต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาในระยะยาวน้อย ทำให้ต้องการระยะเวลาในการบ่มน้อยลง ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ต้องการระยะเวลาในการบ่มมากที่สุดเนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 จะทำปฏิกิริยาในระยะยาว ดังนั้นการบ่มที่ไม่เพียงพอจึงทำให้คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภท 5 มีค่า CSI สูงที่สุด ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับข้อแนะนำของ ACI 308 ที่กำหนดให้ระยะเวลาขั้นต่ำของการบ่มคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีระยะเวลาในการบ่มที่นานที่สุด ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3 ต้องการระยะเวลาการบ่มสั้นที่สุด

3.2.2 กลุ่มที่ 2 ศึกษาผลของปริมาณเถ้าลอย

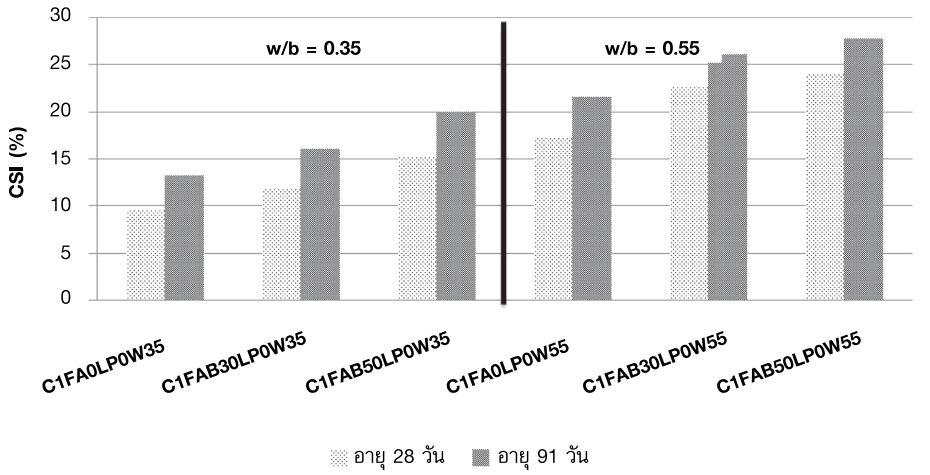
รูปที่ 6 แสดงค่า CSI ของการทดสอบในกลุ่มที่ 2 ที่อายุ 28 และ 91 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยมีค่า CSI มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และค่า CSI จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการใช้เถ้าลอยเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอายุต้น จึงทำให้ปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่ทำปฏิกิริยาไปแล้วตั้งแต่ช่วงอายุต้น ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณน้ำในคอนกรีตยังมีอยู่มาก (ก่อนน้ำระเหยสู่สิ่งแวดล้อมในกรณีของการบ่มในอากาศ) ประกอบกับการระเหยของน้ำของคอนกรีตผสมเถ้าลอยสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน จึงทำให้น้ำที่เหลือในคอนกรีตสำหรับทำปฏิกิริยาของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ในขณะที่ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงอายุยาว ดังนั้นจึงต้องการระยะเวลาการบ่มน้ำนานกว่า ด้วยเหตุผลเหล่านี้ จึงทำให้คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยมี CSI สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนล้วน

3.2.3 กลุ่มที่ 3 ศึกษาผลของชนิดของเถ้าลอยที่ต่างกัน

ผล CSI ตามชนิดของเถ้าลอยในรูปที่ 7 ผลการทดสอบที่อายุ 28 และ 91 วัน แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย FAB มี CSI ต่ำกว่าเถ้าลอย FAA ทั้งอายุ 28 และ 91 วัน ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยทั้งสองประเภทพบว่า เถ้าลอย FAB มีปริมาณ CaO สูงกว่า FAA ซึ่งเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO ที่สูงนี้จะทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่า ดังนั้น จึงต้องการระยะเวลาในการบ่มน้อย อีกทั้งเถ้าลอย FAA มีปริมาณ SiO_2 สูงกว่า FAB ซึ่งเถ้าลอยที่มีปริมาณ SiO_2 สูงนี้จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้มาก จึงต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยามาก ทำให้ต้องการระยะเวลาในการบ่มที่นานกว่า



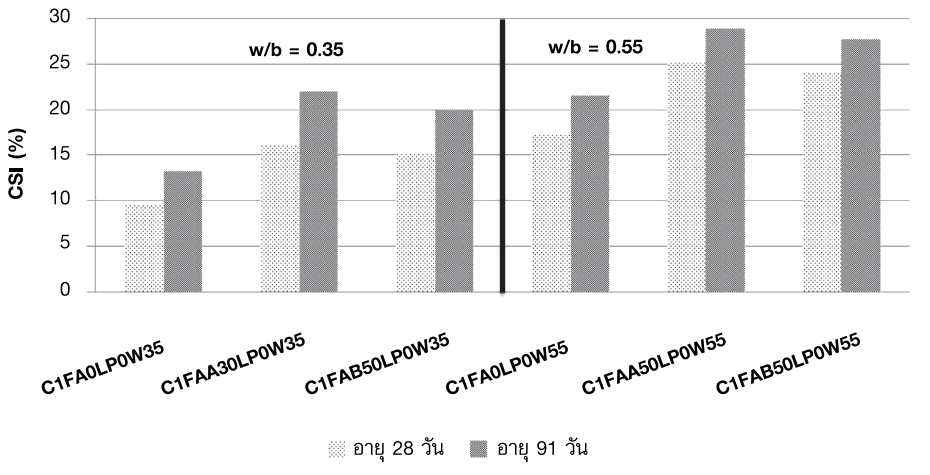
รูปที่ 5 ผลทดสอบค่า CSI ของคอนกรีตในกลุ่มที่ 1



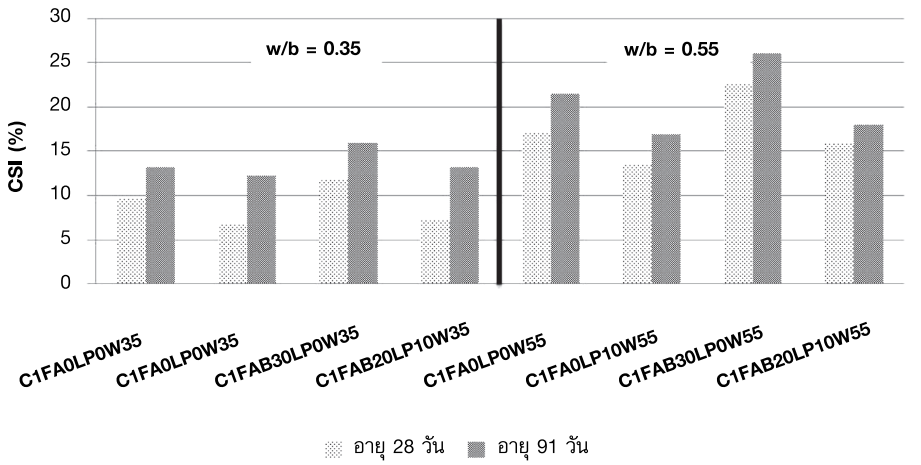
รูปที่ 6 ผลทดสอบค่า CSI ของคอนกรีตในกลุ่มที่ 2

3.2.4 กลุ่มที่ 4 ศึกษาผลการบ่มต่อคอนกรีตที่ใช้ผงฝุ่นหินปูน

รูปที่ 8 แสดงค่า CSI ของการทดสอบในกลุ่มที่ 4 ผลการทดสอบที่อายุ 28 และ 91 วัน แสดงให้เห็นว่า การใช้ผงฝุ่นหินปูนในคอนกรีตสามารถลด CSI ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานร่วม ปูนซีเมนต์-เถ้าลอย ได้ ทั้งนี้เนื่องจากผงฝุ่นหินปูนมีอนุภาคขนาดเล็ก จึงเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างช่องว่าง ทำให้มีพื้นที่ผิวของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์เร็วขึ้น [8] จึงทำให้ปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่ทำปฏิกิริยาไปแล้วตั้งแต่ช่วงอายุต้น ในขณะที่ยังมีน้ำอยู่ในคอนกรีตมาก นอกจากนี้ยังมีผลทำให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงคาปิลลารีลดลง [9] ด้วยเหตุนี้คอนกรีตที่ใช้ผงฝุ่นหินปูนจึงต้องการระยะเวลาการบ่มน้อยลง ดังเหตุผลเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ในกรณีของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3



รูปที่ 7 ผลทดสอบค่า CSI ของคอนกรีตในกลุ่มที่ 3



รูปที่ 8 ผลทดสอบค่า CSI ของคอนกรีตในกลุ่มที่ 4

4. สรุป

จากผลการทดสอบกำลังอัด และ CSI ของคอนกรีต สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การบ่มมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในทุกๆ ส่วนผสม ตัวอย่างคอนกรีตที่บ่มในอากาศจะมีกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตที่บ่มน้ำ

2. เมื่อเปรียบเทียบคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน สามารถสรุปได้ว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3 มีค่า CSI น้อยที่สุด ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีค่า CSI สูงที่สุด

3. คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยมี CSI สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และ CSI ของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณการใช้เถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น

4. คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยประเภท 2ก มี CSI สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยประเภท 2ข

5. การใช้ผงฝุ่นหินปูนผสมในคอนกรีตสามารถลด CSI ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานร่วม ปูนซีเมนต์-เถ้าลอย ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ทางกลุ่มผู้ทำวิจัยขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช) ผู้อนุเคราะห์เงินทุนในการวิจัย และ บริษัท น่ำเฮงคอนกรีต (1992) จำกัด ผู้อนุเคราะห์วัตถุดิบในการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

1. Pierre-Claude Aitcin, Adam Neville, and Paul Acker, 1997, “Integrated view of shrinkage deformation”, *Concrete International*, Vol. 19, Issue 9, pp. 35-41.

2. Wood S.L, 1992, “Evaluation of long-term properties of concrete”, *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 8, pp. 630-643.

3. Baris Ozer, M. Hulusi Ozkul, 2004, “The influence of initial water curing on the strength development of ordinary portland and pozzolanic cement concretes”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, Issue 1, pp. 13-18.

4. ACI Committee 308, 2001, “Guide to curing concrete”, *ACI Manual of Concrete Practice, Part 2*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich. pp. 1-31.

5. EIT 1014 Committee, 2003, *EIT. Standard 1014-46, Standard specification for materials and construction of concrete structures*, Engineering Institute of Thailand Under H.M. The King’s Patronage, 3rd Edition, Global Graphic Printing House. (In Thai)

6. ASTM C 150-02, 2004, “Standard specification for Portland cement”, *Annual Book of ASTM*

Standard, ASTM International, Vol. 4.01, Part 2, pp. 1-7.

7. V. Bonavetti, H. Donza, V. Rahhal and, E. Irassar, 2000, "Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, Issue 5, pp. 703-708.

8. H.H.M. Darweesh, 2004, "Limestone as an accelerator and filler in limestone-substituted alumina cement", *Ceramics International*, Vol. 30, Issue 2, pp. 145-150.

9. Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C., and Chindaprasirt, P., 2004, "Effect of fly ash fineness on compressive strength, total pore volume and pore size of blended cement paste", *Journal of Research and Development KMUTT*, Vol. 1 Jan – March, pp. 17-28. (In Thai)