

ผลของเถ้าหินปูนที่มีต่อสมบัติคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงในช่วงต้น

สรารุท เจริญศิริเสถียร¹ บุรฉัตร ฉัตรวีระ²

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121

และ สมนึก ตั้งเต็มสิริกกุล³

สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้ศึกษาการนำเถ้าจากโรงงานผลิตปูนขาวหรือที่เรียกว่าเถ้าหินปูน เพื่อมาพัฒนาใช้เป็นตัวผสมเพิ่มชนิดใหม่ในงานคอนกรีต เถ้าหินปูนมีลักษณะเป็นผงละเอียดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 204 ไมโครเมตร มีองค์ประกอบหลักทางเคมีเป็นแคลเซียมออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 59.33 โดยน้ำหนัก ในการทดสอบครั้งนี้ได้ใช้ส่วนผสมคอนกรีตกำลังอัดสูงในอายุช่วงต้นที่เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และส่วนผสมที่มีเถ้าลอยแห้งแม่เกาะทดแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงถูกควบคุมให้มีค่าเท่ากับ 0.40 และผันแปรปริมาณเถ้าหินปูนตั้งแต่ร้อยละ 0, 10, 20, 30 ถึง 50 โดยน้ำหนักของทราย ในการทดสอบได้ทำการเปรียบเทียบการพัฒนากำลังของคอนกรีตตั้งแต่ในอายุช่วงต้นที่ 1, 2, 3, 7 จนถึงช่วงปลายที่อายุ 28 วัน นอกจากนี้ยังทำการศึกษาคุณสมบัติความคงทนของคอนกรีตด้านการหดตัวแบบแห้ง ความลึกของการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น ความคงทนต่อการทำลายจากสารละลายซัลเฟต และการซึมผ่านของคลอไรด์ ผลการศึกษาพบว่า สามารถประยุกต์ใช้เถ้าหินปูนปริมาณร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนักของทราย เพื่อเป็นวัสดุผสมเพิ่มซึ่งมีศักยภาพในการเร่งกำลังอัดช่วงต้นของคอนกรีตโดยไม่กระทบต่อกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

¹ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

³ ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา

Eefect of Limestone Ash on Properties of High-Early Strength Concrete

Sarawuth Charoensirisatien¹, Burachat Chatveera²,

Thammasat University, Rangsit Campus, Klong 1, Klong Luang, Pathum Thani 12121

and Somnuk Tangtermsirikul³

Sirindhon International Institute of Technology, Klong 1, Klong Luang, Pathum Thani 12121

Abstract

This article outlines the experimental studies on using limestone ash, by product from lime industry, as a new addition in concrete work. Limestone ash is generally a powder material with 204 micrometer in average particle diameter and has principal oxide composition of 59.33 % CaO. Tests of high-early strength concrete were carried out not only on ordinary portland cement concrete but also Mae Moh fly ash concrete containing 30 % fly ash replacement. Water to binder ratio was controlled at 0.40 while percentages of limestone ash were varied from 0, 10, 20, 30 to 50 by weight of fine aggregate. Strength development of concrete was relatively investigated at ages of 1, 2, 3, 7 and 28 days. Furthermore, durability properties such as drying shrinkage, carbonation depth as well as sulfate resistance and chloride penetration were studied. From test results, it was derived that 10 % and 20 % limestone ash can be applied as the potential addition for accelerating early strength of concrete while maintaining 28-days compressive strength.

¹ Master Degree Student, Department of Civil Engineering.

² Associate Professor, Department of Civil Engineering.

³ Professor, School of Civil Engineering and Technology.

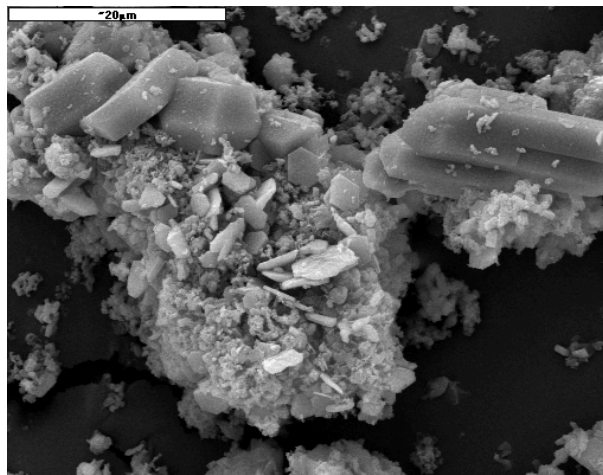
1. บทนำ

เถ้าหินปูน (Limestone Ash) เป็นของเหลือที่ได้จากกระบวนการเผาหินปูนในอุตสาหกรรมผลิตปูนขาว ที่ใช้อุณหภูมิสูงถึง 900-1,000 °ซ มีลักษณะทั่วไปเป็นวัสดุผงและมีรูปร่างของอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุม ดังภาพขยายที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่วิทยาพบว่าองค์ประกอบหลักทางแร่วิทยาเป็นแคลไซต์ (CaCO_3) ดังแสดงผลวิเคราะห์ในรูปที่ 2

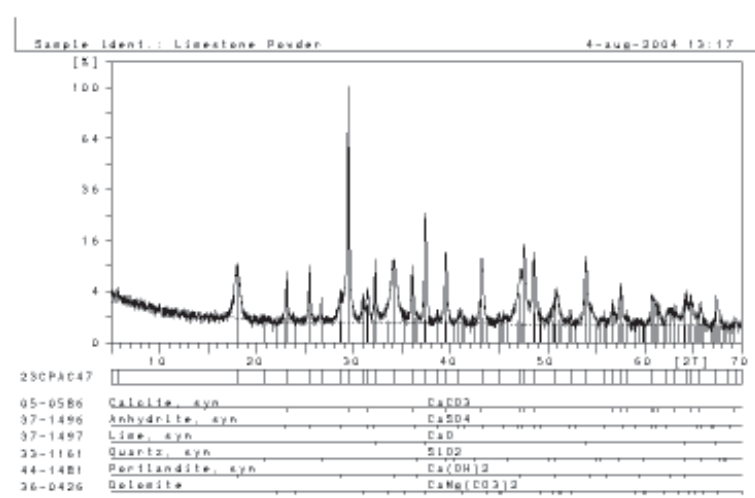
องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าหินปูนเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งมีแนวโน้มที่สามารถนำมาพัฒนาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่ม (Addition) ที่ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านกำลังในคอนกรีตได้ เนื่องจาก CaO ที่ได้จากกระบวนการเผาหินปูนสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ (Reactive silica) ในปูนซีเมนต์เกิดเป็นผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต ($\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$) และมีสมบัติที่เสถียร (Stable) ในน้ำ [1] นอกจากนี้ CaO ก็ยังมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาไฮดรชันและส่งผลกระทบต่อการพัฒนากำลังช่วงต้นของคอนกรีต [2,3]

ที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ผลละเอียดจากหินปูนมีผลต่อปฏิกิริยาไฮดรชันในช่วงต้นขององค์ประกอบ C_3S , C_2A และ C_4AF ในปูนซีเมนต์ [4] และยังพบว่าเป็นส่วนหนึ่งในการทำปฏิกิริยาไฮดรชันของซีเมนต์ [5, 6, 7] รวมถึงมีอิทธิพลทำให้โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของบริเวณระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์กับมวลรวม (Transition zone) ให้มีการอัดแน่น (Packing effect) มากขึ้น [8]

จากการศึกษาทดลองเบื้องต้น (Preliminary study) เมื่อนำเถ้าหินปูนมาทดลองผสมคอนกรีตในปริมาณร้อยละ 5-10 ของปริมาณทราย พบว่า กำลังอัดในช่วงต้นของคอนกรีตเพิ่มขึ้นร้อยละ 10-35 และกำลังอัดระยะยาวเทียบเท่ากับคอนกรีตปกติที่ไม่ใส่เถ้าหินปูน ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ประยุกต์ใช้เถ้าหินปูนให้เหมาะกับประเภทของคอนกรีต โดยศึกษากับคอนกรีตที่ต้องกำลังอัดสูงในช่วงต้น (High early strength concrete) ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมหล่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป เช่น แผ่นพื้นสำเร็จรูป เสาเข็มอัดแรง ผนังและคานหล่อสำเร็จ ฯลฯ ที่กำลังเป็นที่นิยมสำหรับงานก่อสร้างคอนกรีตในปัจจุบัน



รูปที่ 1 ภาพถ่าย Scanning Electron Microscope ขยาย 2,000 เท่าของถ่านหินปูน



รูปที่ 2 ผลวิเคราะห์ห้องค้ประกอบทางแร่วิทยา (XRD) ของเถ้าหินปูน

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

2.1 วัสดุที่ใช้

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตราช้าง และเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ สำหรับเถ้าหินปูน ใช้จากแหล่งบริษัท Lime Master Co., Ltd. มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.56 ค่าการดูดซึ่มร้อยละ 0.5 และ มวลรวมหยาบหินปูนย่อยมีขนาดโตสุด 19 มม. ค่าการดูดซึ่มร้อยละ 0.7 และน้ำยาผสมเพิ่มชนิดลดน้ำจำนวนมาก (Type F Superplasticizer)

2.2 ส่วนผสมคอนกรีต

ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตจะกำหนดให้เถ้าหินปูนเป็นวัสดุผสมเพิ่ม คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของทรายตั้งแต่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตพิจารณาเหมือนกับการออกแบบส่วนผสมโดยทั่วไป โดยใช้ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุผสมปูนซีเมนต์ หิน ทราย และเถ้าหินปูน เท่ากับ 3.15, 2.70, 2.65 และ 2.68 ตามลำดับ สำหรับตัวแปรคงที่ซึ่งได้กำหนดในครั้งนี้ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (Water to Binder Ratio, W/B) เท่ากับ 0.40 ค่าอัตราส่วนทรายต่อมวลรวม (Sand to Aggregate Ratio, S/A) เท่ากับ 0.45 ค่าอัตราส่วนพาสต์ต่อปริมาตรช่องว่างอากาศ (Paste to Void Ratio, γ) เท่ากับ 1.25 ในการศึกษาแบ่งเป็นการทดลองกับคอนกรีต 2 ประเภท ได้แก่ คอนกรีตที่ไม่ใส่เถ้าลอย (OPC) และคอนกรีตที่ทดแทนเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ (FA) โดยมีรายละเอียดส่วนผสมคอนกรีตตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง

ประเภทคอนกรีต	เถ้าหินปูน (%)	เถ้าลอย (%)	ส่วนผสม (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)						
			ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	น้ำ	หิน 3/4" -#4	ทราย	เถ้าหินปูน	Superplasticizer (cc)
OPC	0	0	400	0	160	1,050	850	0	4,000
OPC	10	0	400	0	160	1,050	765	85	4,000
OPC	20	0	400	0	160	1,050	680	170	4,000
OPC	30	0	400	0	160	1,050	595	255	4,000
OPC	50	0	400	0	160	1,050	425	425	4,000
OPC+FA	0	30	264	114	150	1,070	830	0	2,640
OPC+FA	10	30	264	114	150	1,070	747	83	2,640
OPC+FA	20	30	264	114	150	1,070	664	166	2,640
OPC+FA	30	30	264	114	150	1,070	581	249	2,640
OPC+FA	50	30	264	114	150	1,070	415	415	2,640

2.3 วิธีการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

2.3.1 กำลังอัดของคอนกรีต อ้างอิงมาตรฐาน ASTM C 39/C 39M [9] โดยกำหนดวิธีทดสอบ 2 ลักษณะ ได้แก่

- สภาพการบ่มตัวอย่างด้วยน้ำตามปกติ และทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 1, 2, 3, 7 และ 28 วัน โดยจะนำผลไปกำหนดปริมาณการใช้เถ้าหินปูนในการทดสอบความคงทนของคอนกรีต
- สภาพการบ่มตัวอย่างแบบเร่งด้วยอุณหภูมิสูง เป็นศึกษาพฤติกรรมการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตโดยการจำลองวิธีการบ่มคอนกรีตจากกระบวนการผลิตในโรงงานคอนกรีตงานหล่อชิ้นส่วนสำเร็จรูป ซึ่งโดยปกติจะใช้วิธีบ่มด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิสูง เพื่อเร่งการพัฒนากำลังในช่วงต้นของคอนกรีตให้สามารถตัดลวด ถอดแบบ และนำไปใช้งานได้เร็วขึ้น ในการศึกษาจะทำการจำลองวิธีการและทดสอบเฉพาะกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยหลังจากหล่อตัวอย่างคอนกรีตแล้วเสร็จ จะนำตัวอย่างคอนกรีตเข้าตู้อบที่มีอุณหภูมิ 50 °C และ 70 °C รวมทั้งกำหนดค่าระยะเวลาการบ่มนาน 8 และ 10 ชั่วโมง ตัวอย่างคอนกรีตใช้ทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม.

2.3.2 ความคงทนของคอนกรีต

- การหดตัวแบบแห้ง (Drying shrinkage) ตามมาตรฐาน ASTM C 387-99 [9]
- การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน (Carbonation) ตามวิธีการของ RILEM Committee CPC-18, Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depth [10]
- การซึมผ่านของคลอไรด์ (Chloride Penetration) ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 [9]
- ความต้านทานต่อการทำลายจากแมกนีเซียมซัลเฟต (Sulfate attack) ใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม. ตัวอย่างคอนกรีตครบอายุ 23 \pm 1/2 ชั่วโมง นำก่อนตัวอย่างไปทำการชั่งน้ำหนัก จดบันทึกและจากนั้นนำตัวอย่างทั้งหมดไปแช่ในสารละลาย

แมกนีเซียมซัลเฟต เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เพื่อวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างที่อายุ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 วัน และ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 และ 24 สัปดาห์ [11]

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

จากรูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพโดยทั่วไปของเถาหินปูนมีรูปร่างคล้ายอนุภาคปูนซีเมนต์ที่มีความเป็นเหลี่ยมมุมและไม่มีรูโพรง จากตารางที่ 2 การทดสอบค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเถาหินปูนด้วย Air Permeability Test มีค่าเท่ากับ 11,180 ตารางเซนติเมตร/กรัม แต่เมื่อนำมาทดสอบการกระจายของขนาดอนุภาค พบว่า ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคเท่ากับ 203.71 ไมโครเมตร ซึ่งใหญ่กว่าปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ทั้งนี้ เนื่องจากสมบัติทางเคมีมีองค์ประกอบหลักเป็น CaO ประมาณร้อยละ 60 ซึ่งใกล้เคียงกับซีเมนต์ เถ้าหินปูนจึงมีความไวต่อความชื้นในบรรยากาศ และมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาบางส่วนและเริ่มเกาะตัวกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ ซึ่งแตกต่างจากวัสดุประเภทอื่นๆ เช่น เถ้าลอย, ซิลิกาฟูม ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำโดยตรง จากเหตุผลดังกล่าว ทำให้การทดสอบหาค่าเฉลี่ยของอนุภาคจากวิธีการกระจายของขนาดอนุภาค (Size distribution) ได้ค่าที่มีขนาดอยู่ระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์กับมวลรวมละเอียดและไม่สอดคล้องกับผลจากการทดสอบพื้นที่ผิวด้วยวิธี Air Permeability

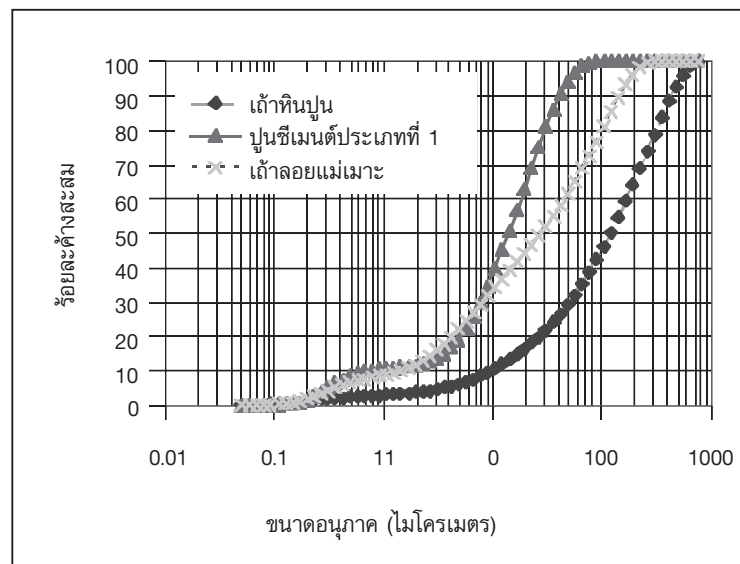
ค่าความถ่วงจำเพาะของเถาหินปูนมีค่าเท่ากับ 2.68 ค่าส่วนค้ำตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 64.9 ในขณะที่การขยายตัวแบบอโตเคลฟของมอร์ตาร์มีค่าร้อยละ 0.01 ซึ่งสูงกว่าปูนซีเมนต์และเถ้าลอยทดแทนร้อยละ 20 เล็กน้อย แต่ต่ำกว่ามากเมื่อเทียบกับค่าที่ยอมรับคือ ร้อยละ 0.8 อย่างไรก็ตาม ผลทดสอบความคงตัวจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสัดส่วนปริมาณการใช้เถาหินปูน ทั้งนี้ ในบทความนี้ใช้เถาหินปูนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักทรายซึ่งแนวโน้มของค่า Autoclave Expansion ที่ทดสอบออกมาพบว่าตัวอย่างมีการขยายตัวร้อยละ 0.01 ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ Free CaO เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอยซึ่งตัวอย่างที่ทดสอบมีการหดตัวเท่ากับร้อยละ -0.01 และร้อยละ -0.02 ตามลำดับ

สำหรับค่าดัชนีกำลังมีค่าสูงกว่าทั้งปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 101.8 ซึ่งจากรูปที่ 3 พบว่า อนุภาคมีการกระจายตัวอยู่ระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์กับมวลรวมละเอียด ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อค่าดัชนีกำลังด้วยผลของการแทรกตัวระหว่างอนุภาคมวลรวมละเอียดซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า (Packing effect)

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

สมบัติ	ผลทดสอบ		
	เถ้าหินปูน	เถ้าลอยแม่เมาะ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1
พื้นที่ผิวจำเพาะ, cm^2/g	11,180	2,640	3,240
ส่วนค้ำตะแกรงเบอร์ 325, %	64.9	46.1	-
ความถ่วงจำเพาะ	2.68	2.30	3.10
Autoclave Expansion, %	0.01 ¹	-0.02 ²	-0.01
ค่าดัชนีกำลัง, %	101.8 ¹	80.5 ²	100
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, μm	203.71	62.06	20.25

¹ ทดแทนทรายร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก, ² ทดแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 3 การกระจายของขนาดอนุภาคของเถ้าหินปูน ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยแม่เมาะ

3.2 คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ

จากตารางที่ 3 องค์ประกอบหลักที่พบเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีปริมาณสูงถึงร้อยละ 59.33 ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติด้านกำลังในช่วงต้นของคอนกรีต สำหรับ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มีอยู่ในปริมาณน้อยมากเนื่องจากเถ้าหินปูนได้จากกระบวนการเผาหินปูนซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) สำหรับปริมาณ Free CaO มีค่าร้อยละ 25.98 ซึ่งส่งผลกระทบต่อความคงตัวดังที่ได้กล่าวถึงผลทดสอบการขยายตัวแบบออโตเคลฟในข้างต้น ในขณะที่ค่า LOI มีค่าสูงซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความต้องการน้ำที่เพิ่มขึ้นและลดสามารถเทได้ของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม สามารถปรับปรุงสมบัติความสามารถเทได้ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าหินปูน โดยการใช้สารเคมีผสมเพิ่ม (Mineral admixture) ที่เหมาะสม

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ทดสอบ

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	เถ้าหินปูน	เถ้าลอยแม่เมาะ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1
SiO ₂	< 0.01	38.07	2810
Al ₂ O ₃	0.19	22.89	4.93
Fe ₂ O ₃	0.17	12.12	3.35
CaO	59.33	18.40	66.04
MgO	1.70	2.26	0.81
K ₂ O	< 0.01	2.29	0.56
Na ₂ O	< 0.01	1.09	< 0.01
SO ₃	2.45	1.77	2.57
Free CaO	25.98	0.72	0.73
LOI	36.10	0.03	1.03

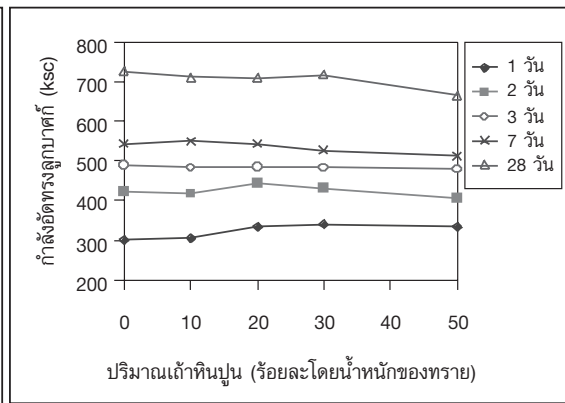
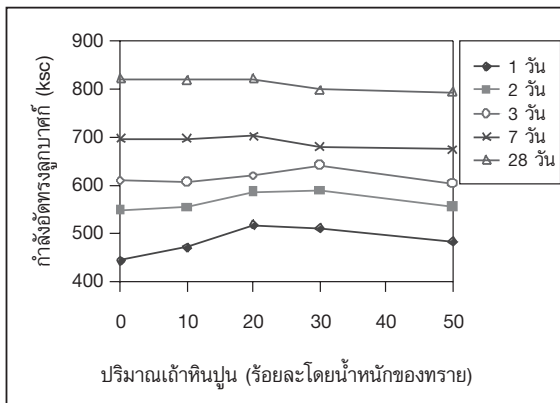
3.3 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าหินปูน

3.3.1 กำลังอัดคอนกรีตที่อยู่ในสภาพบ่มน้ำ

ในส่วนผสมคอนกรีตที่ไม่ใส่เถ้าลอย เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม พบว่า ที่ปริมาณเถ้าหินปูนร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 มีผลทำให้กำลังอัดช่วงต้นที่อายุ 1, 2 และ 3 วัน เพิ่มขึ้น แต่ที่ปริมาณเถ้าหินปูนร้อยละ 30 และร้อยละ 50 มีผลทำให้กำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน ลดลง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4

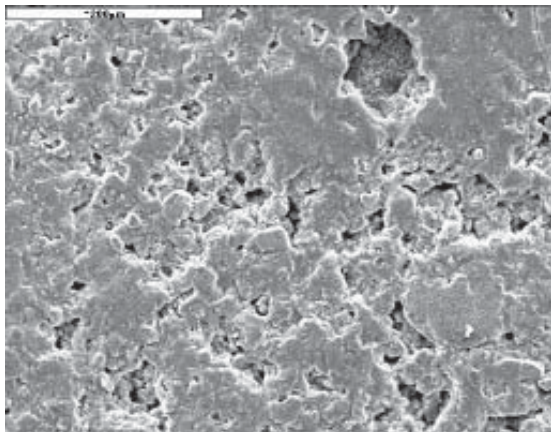
สำหรับส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม พบว่า ที่ปริมาณเถ้าหินปูนร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 มีผลทำให้กำลังอัดช่วงต้นที่อายุ 1 และ 2 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อพิจารณาที่ปริมาณเถ้าหินปูนร้อยละ 30 และ 50 มีแนวโน้มทำให้กำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน ลดลง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5

จากผลทดสอบ กล่าวได้ว่าเถ้าหินปูนสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตด้านกำลังอัดในอายุช่วงต้นซึ่งเป็นผลทางปฏิกิริยาเคมีจากองค์ประกอบหลักทางเคมีที่เป็นแคลเซียมออกไซด์ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ Reactive SiO₂ ในปูนซีเมนต์กับน้ำในคอนกรีต ทำให้ได้ผลผลิตที่เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CaO-SiO₂-H₂O) [1] ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สามารถรับกำลังได้ โดยรูปที่ 6 และ 7 แสดงผลภาพขยาย 200 เท่า ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 1 วัน และนอกจากนี้แล้ว ยังมีผลทางกายภาพที่เกิดจากขนาดของอนุภาคของเถ้าหินปูนแทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคมวลรวมละเอียดอีกด้วยเช่นกัน

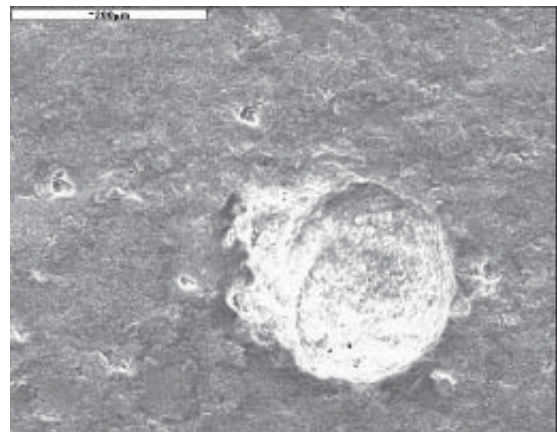


รูปที่ 4 กำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย
เปรียบเทียบที่ปริมาณเถ้าหินปูนร้อยละ 0, 10,
20, 30 และ 50 ของน้ำหนักราย

รูปที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30
เปรียบเทียบที่ปริมาณเถ้าหินปูนร้อยละ 0, 10,
20, 30 และ 50 ของน้ำหนักราย

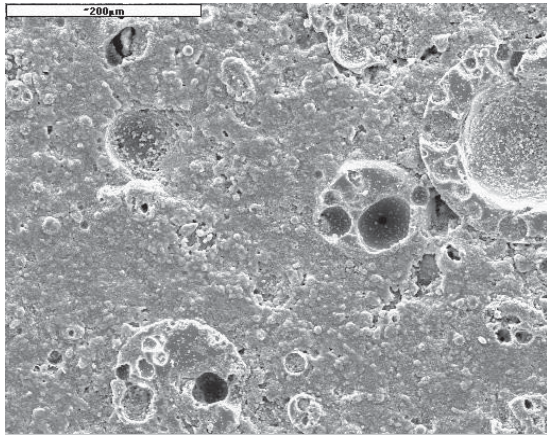


(ก) ไม่ผสมเถ้าหินปูน

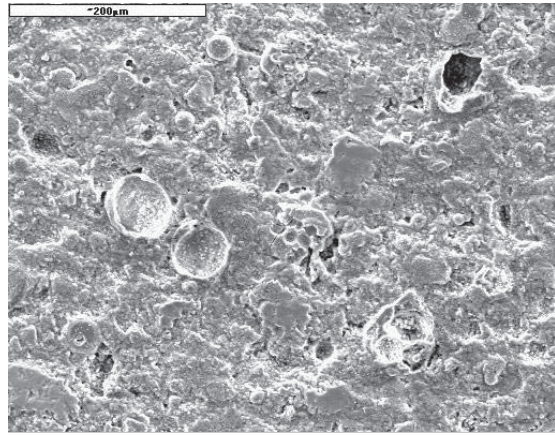


(ข) ผสมเถ้าหินปูนร้อยละ 20

รูปที่ 6 ภาพขยาย 200 เท่า โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์อายุ 1 วัน

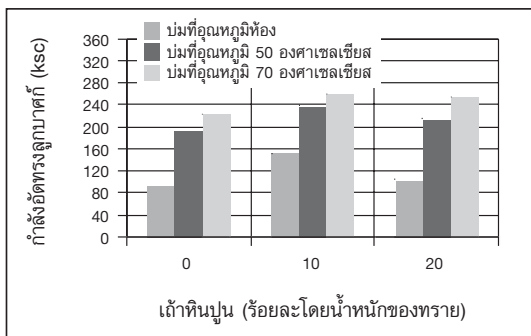


(ก) ไม่ผสมเถ้าหินปูน

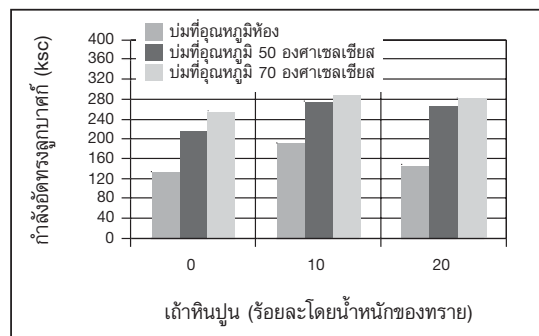


(ข) ผสมเถ้าหินปูนร้อยละ 20

รูปที่ 7 ภาพขยาย 200 เท่า โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เฟสผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 ที่อายุ 1 วัน



รูปที่ 8 ผลทดสอบกำลังอัดหลังจากบ่มตัวอย่าง เป็นเวลานาน 8 ชั่วโมง เปรียบเทียบที่ปริมาณ เถ้าหินปูนร้อยละ 0, 10, 20 โดยน้ำหนักของทราย



รูปที่ 9 ผลทดสอบกำลังอัดหลังจากบ่มตัวอย่าง เป็นเวลานาน 10 ชั่วโมง เปรียบเทียบที่ปริมาณ เถ้าหินปูนร้อยละ 0, 10, 20 โดยน้ำหนักของทราย

3.3.2 กำลังอัดคอนกรีตที่อยู่ในสภาพบ่มแบบเร่งกำลังอัด

จากการทดสอบโดยกำหนดสภาพการบ่มคอนกรีต 3 ลักษณะได้แก่ บ่มที่อุณหภูมิห้องภายนอกตู้อบ และบ่มแบบควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 °ซ กับที่อุณหภูมิ 70 °ซ พบว่า กำลังอัดคอนกรีตที่ผสมเถ้าหินปูนปริมาณร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของทราย มีกำลังอัดสูงกว่าส่วนผสมควบคุมที่ไม่ผสมเถ้าหินปูน ทั้งช่วงระยะเวลาการบ่มนาน 8 และ 10 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิการบ่มส่งผลต่อการเกิดผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CaO-SiO₂-H₂O) ในอายุช่วงต้นให้เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังผลทดสอบกำลังอัดที่แสดงไว้ในรูปที่ 8 และ 9

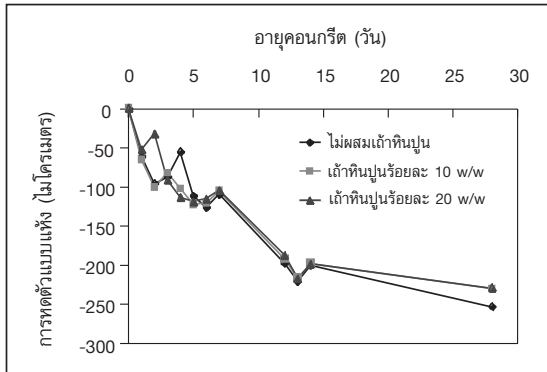
3.4 ความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าหินปูน

3.4.1 การหดตัวแบบแห้ง ค่าการหดตัวแบบแห้งที่ 28 วันมีค่าใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากันทุกส่วนผสมนั้นแสดงว่า ส่วนผสมคอนกรีตที่มีเถ้าหินปูนปริมาณร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของทราย ไม่ส่งผลต่อสมบัติการหดตัวแบบแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณการใช้เถ้าหินปูนที่ไม่สูงมาก ทำให้ความต้องการน้ำของคอนกรีตผสมเถ้าหินปูนไม่เพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำอิสระ (Free water) ในคอนกรีตจึงมีค่าไม่แตกต่างกัน จึงไม่ส่งผลต่อการหดตัวแบบแห้งด้วยเช่นกัน ผลทดสอบการหดตัวแบบแห้งแสดงไว้ในรูปที่ 10

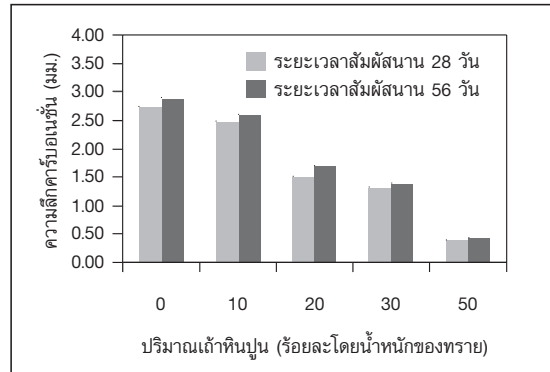
3.4.2 การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น จากผลทดสอบการดั่งแสดงไว้ในรูปที่ 11 พบว่า ปริมาณเถ้าหินปูนที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 ของน้ำหนักทราย มีผลทำให้การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นมีค่าลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากเป็นผลของการเกิดผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CaO-SiO₂-H₂O) ในอายุช่วงต้นรวมทั้งผลของการแทรกตัว (Filler effect) ของเถ้าหินปูน รวมถึงปัจจัยจากสภาพแวดล้อมของการทดสอบที่แห้งและไม่สัมผัสกับน้ำ จึงทำให้คอนกรีตมีความตึงเครียดมากขึ้นและส่งผลทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านได้น้อยลง ความลึกของการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นในคอนกรีตจึงลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีผสมเถ้าหินปูน

3.4.3 การซึมผ่านของคลอไรด์ ที่อายุคอนกรีต 28 วัน ผลทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์แสดงไว้ในรูปที่ 12 จะเห็นว่า มีแนวโน้มสูงขึ้นในส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าหินปูน ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความพรุน (Porosity) ของคอนกรีตที่มีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย อันเนื่องมาจากการที่คอนกรีตต้องสัมผัสกับสารละลายตลอดเวลา ทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเถ้าหินปูนซึ่งโดยปกติจะไม่เสถียรในน้ำในช่วงเวลาระยะยาว [1] ถูกชะล้างออกมา ผลทดสอบค่าความพรุนซึ่งวัดในรูปของปริมาณช่องว่างในเพสต์ที่มีอายุ 28 วันได้แสดงไว้ในรูปที่ 13

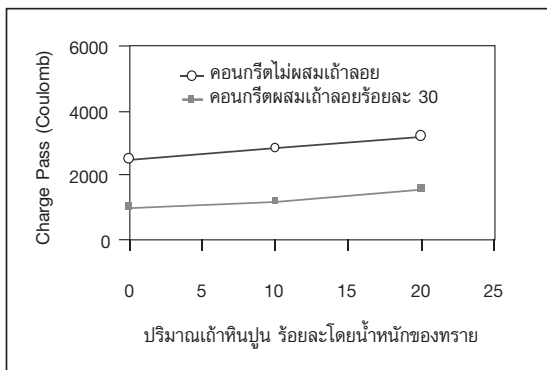
3.4.4 ความต้านทานต่อการทำลายจากซัลเฟต ส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าหินปูนในปริมาณร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักทราย มีการสูญเสียน้ำหนักจากการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตมากกว่าส่วนผสมควบคุมเล็กน้อย โดยเป็นผลจากปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในเถ้าหินปูนที่ไม่เสถียรในน้ำในช่วงเวลาระยะยาว [1] และทำให้คอนกรีตมีความพรุนมากขึ้น ผลทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตแสดงไว้ในรูปที่ 14



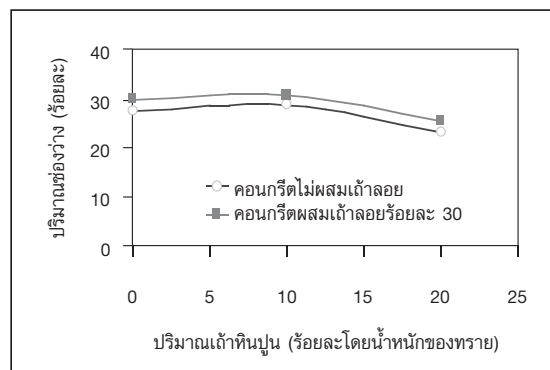
รูปที่ 10 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ร้อยละ 30 (FA) เปรียบเทียบกับปริมาณเถ้าหินปูน ร้อยละ 0, 10, และ 20 ของน้ำหนักทราย



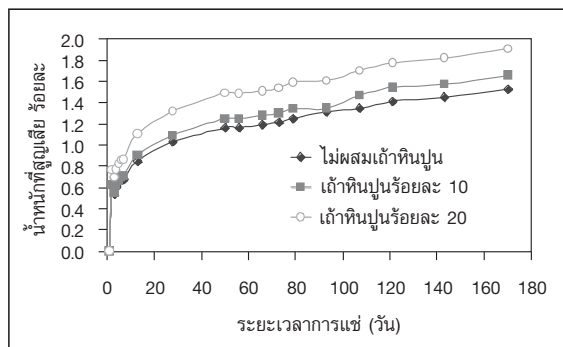
รูปที่ 11 ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ร้อยละ 30 (FA) ที่ปริมาณเถ้าหินปูนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 50 ของน้ำหนักทราย



รูปที่ 12 สมบัติการซึมผ่านของคลอไรด์ ในคอนกรีต เปรียบเทียบกับปริมาณเถ้าหินปูน ร้อยละ 0, 10 และ 20 ของน้ำหนักทราย



รูปที่ 13 ปริมาณช่องว่างในเฟสที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับปริมาณเถ้าหินปูนร้อยละ 0, 10 และ 20 ของน้ำหนักทราย



รูปที่ 14 น้ำหนักที่สูญเสียจากการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เปรียบเทียบกับปริมาณเถ้าหินปูนร้อยละ 0, 10 และ 20 ของน้ำหนักทราย

4. สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาพบว่า ถ้าหินปูนจากอุตสาหกรรมผลิตปูนขาวสามารถนำมาใช้งานเป็นสารผสมเพิ่มในงานคอนกรีตได้โดยปริมาณที่เหมาะสมคือร้อยละ 10 ถึง 20 โดยน้ำหนักของทรายโดยคุณสมบัติการรับกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าหินปูนมีแนวโน้มสูงขึ้นในอายุช่วงต้นที่ 1 วันอย่างชัดเจน และไม่กระทบต่อกำลังอัดที่ 28 วัน

ในด้านความคงทน ถ้าหินปูนไม่กระทบต่อคุณสมบัติด้านการหดตัวแบบแห้งในคอนกรีต แต่ส่งผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติความคงทนด้านการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นให้ดีขึ้นจึงเหมาะสำหรับงานโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณสภาพแวดล้อมที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หนาแน่น อย่างไรก็ตาม ความคงทนต่อการทำลายจากซัลเฟตและคลอไรด์จะลดลง ซึ่งในการใช้งานควรพิจารณาใช้ให้เหมาะกับลักษณะงานโครงสร้างซึ่งไม่ควรสัมผัสหรืออยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีซัลเฟตและคลอไรด์

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ บริษัท ไล้มีมาสเตอร์ จำกัด ในฐานะผู้สนับสนุนและอนุเคราะห์ตัวอย่างเถ้าหินปูนในการศึกษาครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

1. Mehta, P. K. and Monteiro, P. J., 1986, *Concrete Structure, Properties, and Materials*, Prentice Hall, New Jersey, United State.
2. Neville, A. M., 1999, *Properties of Concrete*, Fourth Edition, Longman Group United, England.
3. Tangtermsirikul, S., 2003, *Durability and Mix Design of Concrete*, First Edition, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, Pathumtani, Thailand.
4. Stark, J., Freyberg, E., and Lohmer, K., 1999, "Investigations into the Influence of Limestone Additions to Portland Cement Clinker Phases on the Early Phase of Hydration", *Modern Concrete Materials : Binders, Additions and Admixtures*, Thomas, Telford, London, England pp. 69-77.
5. Klemm, W.A. and Adams, L. D., 1990, *An Investigation of the Formation of Carboaluminates in Carbonate Additions to Cement*, Klieger and Hooton, Eds. ASTM STP 1064, pp. 60-72.
6. Borgholm, H. E., Herfort, D., and Rasmussen, S., 1995, "A New Blended Cement Based on Mineralized Clinker", *World Cement*, Vol. 8, pp. 27-33.

7. Ingram, K. D. and Daugherty, K. E., 1994, "A Review of Limestone Additions to Portland Cement and Concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 13, No. 3, pp. 165-170.
8. Xie Ping, J. J. and Brousseau, 1991, "Effect of Aggregate Size on the Transition Zone Properties at the Portland Cement Paste Interface", *Cement and Concrete Research*, Vol. 21, No. 6, pp. 999-1005.
9. ASTM Committee, 1994, *Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 : Concrete and Aggregate*, American Concrete Institute.
10. RILEM Committee CPC-18, 1988, *Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depth*, RILEM.
11. Krammart, P. and Tangtermsirikul, S. 2003, "Strength Reduction and Expansion of Fly Ash Concrete in Sulfate Solution", *the First National Concrete Conference*.
12. สมณีกร ตั้งเต็มสิริกุล, 2543, *ความคงทนของคอนกรีต*, พิมพ์ครั้งที่ 1, จุดทอง, กรุงเทพมหานคร.