

ผลกระทบของเถ้าก้นเตาต่อการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานร่วมสองชนิด EFFECT OF BOTTOM ASH ON AUTOGENOUS SHRINKAGE OF BINARY BINDER MORTAR

สนธยา ทองอรุณศรี¹ สรรณกร เหมะวิบูลย์² พงษ์ศักดิ์ โชคทวีภาณุจัน³ สมนึก ตั้งเต็มสิริกกุล⁴

¹อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

³อดีตอาจารย์วิจัย ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร

⁴ศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร

ARTICLE INFO:

Received: September 28, 2015

Received Revised Form: November 24, 2015

Accepted: December 2, 2015

ABSTRACT :

In this study, effect of bottom ash as a partial replacement of fine aggregate on autogenous shrinkage of cement-only and binary binder mortar was investigated. The autogenous shrinkage was studied in mortar with the river sand partially replaced with bottom ash at 0%, 10%, 20% and 30% by volume. Two types of bottom ash having low water retainability (18.8%) and high water retainability (29.6%) were used in this study. The influence of types of cement (Type I, III and V) on autogenous shrinkage of mortar with bottom ash was investigated. The control mixture included only Ordinary Portland Cement (OPC) while the binary mixtures were prepared by blending the OPC with fly ash. The weight percentage of replacement of cement by fly ash was 30%. The results indicated that the use of bottom ash could reduce autogenous shrinkage of mortar. The autogenous shrinkage decreased with the increase of bottom ash content. The high water retainability bottom ash was more effective to reduce autogenous shrinkage than that of the low water retainability bottom ash. These phenomena had also been found in the binary binder system. The use of bottom ash in fly ash-cement mortar also reduced autogenous shrinkage.

KEYWORDS: Bottom ash, Fly ash, Lightweight aggregate, Autogenous shrinkage, Binary binder system

*Corresponding Author,
Email address: ¹sontaya@rmutl.ac.th,

²saranagonh@nu.ac.th,

³pongsak@siit.tu.ac.th,

⁴somnuk@siit.tu.ac.th

1. บทนำ

ปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตสามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง ตราบใดที่ยังคงมีน้ำและปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา (Unhydrated Cement) อยู่ภายในคอนกรีต การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่องส่งผลต่อคอนกรีตในด้านต่างๆ เช่น การพัฒนากำลัง การเพิ่มความหนาแน่นและเพิ่มความคงทนของคอนกรีต ดังนั้นการบ่มคอนกรีตจึงมีความสำคัญอย่างมากในช่วงอายุต้นของคอนกรีต โดยทั่วไปวิธีการบ่มที่ดีที่สุดคือ การบ่มด้วยน้ำ เนื่องจากน้ำที่ใช้ในการบ่มสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีต ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ในกรณีของคอนกรีตกำลังสูงซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ

ช่องว่างในคอนกรีตจะมีขนาดเล็กมากจนทำให้น้ำจากภายนอกไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้อย่างเพียงพอ ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้น้อย นอกจากนี้ในคอนกรีตกำลังสูงยังเกิดการหดตัวแบบออโตจีนัสสูงมาก จนทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวในช่วงอายุต้นได้ง่าย ที่ผ่านมามีการศึกษาการนำวัสดุที่มีคุณสมบัติในการกักเก็บน้ำได้ดีมาผสมในคอนกรีต เพื่อให้พื้นที่ถูกกักเก็บอยู่ภายในวัสดุนั้นค่อยๆ ถูกดึงมาใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างช้าๆ ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง แม้ไม่มีน้ำจากภายนอกก็ตาม ซึ่งจะช่วยลดลดปัญหาการบ่มคอนกรีตที่ไม่เพียงพอ นอกจากนี้ยังสามารถลดการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตได้ วัสดุที่นำมาใช้จึงถูกเรียกว่า “วัสดุบ่มภายใน”

วัสดุบ่มภายในแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ วัสดุบ่มภายในที่เป็นมวลรวมเบา ซึ่งมีความพรุนสูง และวัสดุบ่มภายในที่สังเคราะห์ขึ้น เช่น โพลีเมอร์ที่มีการดูดซึมสูง วัสดุทั้งสองประเภทมีสมบัติในการกักเก็บน้ำได้ดี แต่เนื่องจากวัสดุบ่มภายในที่สังเคราะห์ขึ้นมีราคาแพง จึงทำให้การใช้วัสดุมวลเบาที่มีความพรุนสูง มีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้งานจริงได้มากกว่า ที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาการใช้มวลรวมเบาที่มีความพรุนในรูปของวัสดุบ่มภายใน [1-10] ในประเทศไทยมีวัสดุที่มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุบ่มภายในได้แก่ ถ้ำก้นเตา (Bottom ash) เนื่องจากถ้ำก้นเตามีความพรุนสูง จึงกักเก็บน้ำได้ดี นอกจากนี้ถ้ำก้นเตาเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหิน เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีปริมาณมากและต้องใช้พื้นที่จำนวนมากในการจัดเก็บ ถ้ำก้นเตามีความพรุนสูงและมีการกระจายอนุภาคใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด ดังนั้นจึงมีการนำถ้ำก้นเตามาใช้ในรูปของวัสดุบ่มภายใน [1,5,9,10] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้มวลรวมเบาที่มีความพรุนสูงเป็นวัสดุบ่มภายใน สามารถลดการหดตัวแบบออโตจีนิกของคอนกรีต [7,8] ในกรณีที่ควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์และค่าการยุบตัวให้ใกล้เคียงกัน การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยถ้ำก้นเตา ในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 30 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด ไม่ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงมากนัก แต่หากแทนที่มากกว่าร้อยละ 30 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด จะทำให้กำลังลดลงอย่างมาก การใช้ถ้ำก้นเตาทำให้การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตลดลง โดยการหดตัวลดลงตามการแทนที่ของถ้ำก้นเตาที่เพิ่มขึ้น [9,10]

แม้ว่าที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการนำถ้ำก้นเตามาใช้ลดการหดตัวแบบออโตจีนิกของคอนกรีต แต่ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว งานวิจัยที่ศึกษาการใช้ถ้ำก้นเตาในวัสดุประสานร่วมสองชนิดยังมีน้อยมาก นอกจากนี้ประเทศไทยมีการใช้ถ้ำก้นเตาในงานคอนกรีตกันอย่างกว้างขวาง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของถ้ำก้นเตาต่อการหดตัวแบบออโตจีนิกของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานร่วมสองชนิด โดยใช้ปูนซีเมนต์ร่วมกับถ้ำก้นเตา และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้ถ้ำก้นเตาในการลดการหดตัวแบบออโตจีนิกของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน กับมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานร่วมสองชนิด เพื่อเป็นแนวทางในการใช้ถ้ำก้นเตาในงานคอนกรีตได้อย่างเหมาะสม

2. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 วัสดุประสาน

วัสดุประสานที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Type I) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 (Type III) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (Type V) และถ้ำก้นเตา ซึ่งสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี แสดงดังตารางที่ 1

ปริมาณสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์คำนวณจาก Bouge's Equation แสดงดังตารางที่ 2 ถ้ำก้นเตาที่ใช้นำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง ลักษณะรูปร่างอนุภาคของถ้ำก้นเตาแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งพบว่ามิลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมและมีหลายขนาดปะปนกัน

2.2 มวลรวม

งานวิจัยนี้ใช้มอร์ตาร์ในการศึกษาการหดตัวแบบออโตจีนิกมวลรวมที่ใช้จึงเป็นมวลรวมละเอียด ที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 มวลรวมละเอียดที่ใช้ ได้แก่ ทรายแม่น้ำ และถ้ำก้นเตา โดยถ้ำก้นเตาที่ใช้ มี 2 ชนิด ได้แก่ BAH และ BAMB ซึ่งเป็นถ้ำก้นเตาที่ได้จากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินบิทูมินัส และถ่านหินลิกไนต์ เป็นเชื้อเพลิงตามลำดับ จึงทำให้มีองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ ลักษณะพื้นผิวของถ้ำก้นเตามีลักษณะขรุขระ มีรูพรุน และมีรูปร่างไม่แน่นอน แสดงดังรูปที่ 2 จึงทำให้สามารถกักเก็บน้ำได้ดี ส่วนการกระจายขนาดผลของทรายและถ้ำก้นเตา แสดงดังรูปที่ 3 ค่าการกักเก็บน้ำ (Water retrainability, WR) ของถ้ำก้นเตาในงานวิจัยนี้ทดสอบตามวิธีของ Kasemchaisiri และ Tangtermsirikul [11] โดยค่าร้อยละการกักเก็บน้ำของ BAH และ BAMB มีค่าเท่ากับ 18.8 และ 29.6 ตามลำดับ ถ้ำก้นเตาจะถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และปรับความชื้นให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าร้อยละการกักเก็บน้ำของถ้ำก้นเตาแต่ละชนิด แล้วเก็บในภาชนะที่มีดัด เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของถ้ำก้นเตา ก่อนนำไปใช้เป็นส่วนผสมของมอร์ตาร์

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ส่วนผสมที่ใช้ในการวิจัย

ส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษามีทั้งสิ้น 20 ส่วนผสม ดังตารางที่ 5 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B ratio) เท่ากับ 0.35 อัตราส่วนวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1 : 1.5 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ไม่ทำให้เกิดการเยิ้มในมอร์ตาร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้ำก้นเตาเท่ากับ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยถ้ำก้นเตาเท่ากับ 10, 20 และ 30 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด ส่วนผสมทั้ง 20 ส่วนผสมจะถูกเตรียมและนำไปทดสอบระยะเวลาก่อตัวและการหดตัวแบบออโตจีนิกต่อไป

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุ
ประสาน

Chemical Composition (%)	Portland Cement			Fly Ash
	Type I	Type III	Type V	
SiO ₂	19.87	19.96	21.40	39.40
Al ₂ O ₃	4.87	5.36	3.91	17.93
Fe ₂ O ₃	3.55	3.18	4.06	12.92
CaO	65.03	64.61	64.60	19.19
MgO	2.52	1.23	1.02	2.99
SO ₃	0.73	3.59	2.39	3.03
Na ₂ O	0.02	0.02	0.02	1.36
K ₂ O	0.45	0.33	0.27	2.50
TiO ₂	0.26	0.25	0.20	0.34
P ₂ O ₅	0.07	0.06	0.05	0.20
LOI	2.26	1.09	1.42	0.17
Physical Properties				
Specific Gravity (g/cm ³)	3.11	3.07	3.12	2.29
Blaine Surface Area (cm ² /g)	3,480	4,500	4,030	2,836

ตารางที่ 2 สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์

Mineral Composition (%)	Portland Cement		
	Type I	Type III	Type V
C ₃ S	69.0	63.6	62.8
C ₂ S	7.1	13.9	16.3
C ₃ A	6.6	4.9	1.9
C ₄ AF	10.6	11.7	13.6

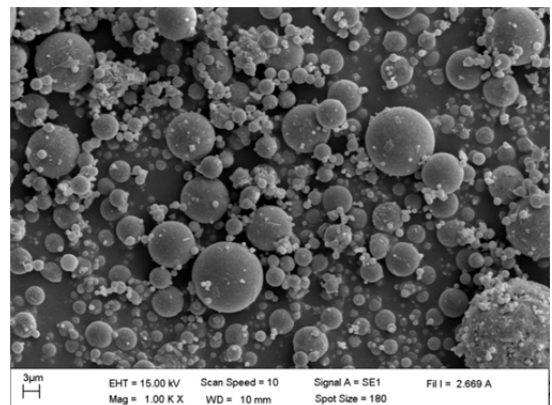
ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตา

Chemical Composition (%)	Bottom Ash	
	BAH	BAMM
SiO ₂	73.15	47.45
Al ₂ O ₃	18.34	20.32
Fe ₂ O ₃	4.15	10.92
CaO	1.35	13.16
MgO	0.65	2.60
SO ₃	0.04	1.16
Na ₂ O	0.21	1.03

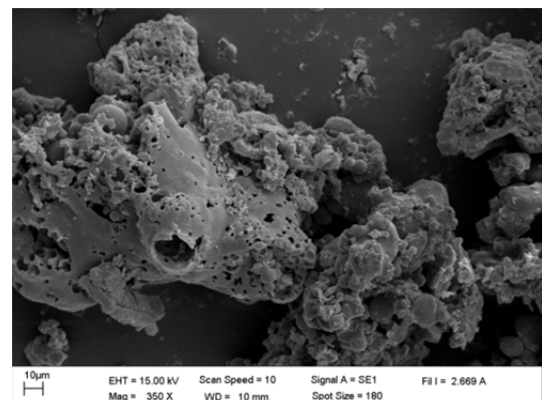
Chemical Composition (%)	Bottom Ash	
	BAH	BAMM
K ₂ O	1.00	2.70
TiO ₂	0.89	0.41
P ₂ O ₅	0.19	0.16
LOI (%)	2.95	3.11

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางกายภาพของมวลรวม

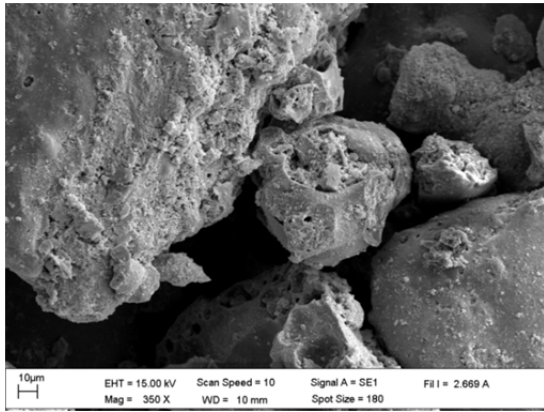
Physical Composition	Sand	BAH	BAMM
Specific Gravity (g/cm ³)	2.58	2.03	2.64
Water Absorption (%)	0.78	-	-
Water Retainability (%)	-	18.8	29.6



รูปที่ 1 ภาพกำลังขยายสูง (SEM) ของเถ้าลอย (1000X)

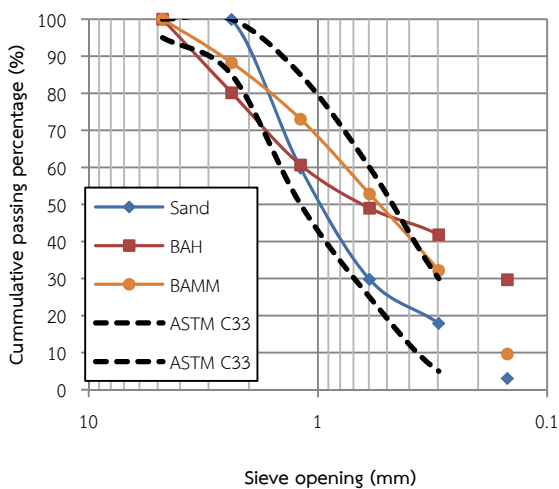


(ก) BAH



(ข) BMM

รูปที่ 2 ภาพกล้องจุลทรรศน์ (SEM) ของเถ้าก้นเตา (350X)

รูปที่ 3 การกระจายขนาดผลของทรายและเถ้าก้นเตา
ตารางที่ 5 สัดส่วนผสมของมอร์ต้า

No.	Mix notation	FA (%)	BA (%)	Type of BA	Type of Cement
1	C1	0	0	-	I
2	C3	0	0	-	III
3	C5	0	0	-	V
4	C1BAH10	0	10	BAH	I
5	C1BAH20	0	20	BAH	I
6	C1BAH30	0	30	BAH	I
7	C1BAMM10	0	10	BMM	I
8	C1BAMM20	0	20	BMM	I
9	C1BAMM30	0	30	BMM	I
10	C1FA30	30	0	-	I
11	C1FA30BAH10	30	10	BAH	I
12	C1FA30BAH20	30	20	BAH	I
13	C1FA30BAH30	30	30	BAH	I

No.	Mix notation	FA (%)	BA (%)	Type of BA	Type of Cement
14	C1FA30BAMM10	30	10	BMM	I
15	C1FA30BAMM20	30	20	BMM	I
16	C1FA30BAMM30	30	30	BMM	I
17	C3BAH30	0	30	BAH	III
18	C3BAMM30	0	30	BMM	III
19	C5BAH30	0	30	BAH	V
20	C5BAMM30	0	30	BMM	V

หมายเหตุ : FA คือ ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย, BA คือ ร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตา

3.2 วิธีการทดสอบ

3.2.1 ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ต้า

งานวิจัยนี้เริ่มวัดการหดตัวของแบบบอโตจีนัสของมอร์ต้าเมื่อตัวอย่างมีอายุ 2 ชั่วโมง หลังจากระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ต้า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ต้าในทุกส่วนผสม โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C403 ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีขนาด 15x15x15 เซนติเมตร ในแต่ละส่วนผสมใช้จำนวน 2 ตัวอย่างเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย บทความนี้ใช้ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ต้าในการกำหนดจุดเริ่มต้นของการวัดการหดตัวเท่านั้น จึงไม่นำเสนอผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลของระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ต้า

3.2.2 การหดตัวของแบบบอโตจีนัสของมอร์ต้า

ทดสอบการหดตัวของแบบบอโตจีนัส ตามมาตรฐาน ASTM C157 ตัวอย่างที่ใช้มีขนาด 7.5x7.5x28.5 เซนติเมตร ใช้จำนวน 4 ตัวอย่างเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย ในงานวิจัยนี้เริ่มวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวอย่าง เมื่อมอร์ต้ามีอายุ 2 ชั่วโมง หลังจากระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ต้า เพื่อให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะถอดออกจากแบบโดยไม่เกิดความเสียหาย การหดตัวของแบบบอโตจีนัสเป็นการหดตัวที่ไม่มีการสูญเสียความชื้นออกสู่สิ่งแวดล้อม จึงหุ้มตัวอย่างด้วยเทปอลูมิเนียมหนา 5 มิลลิเมตร 2 ชั้นตามด้วยพลาสติกใส 5 ชั้นและเทปกาวใส 2 ชั้น วัดค่าการหดตัวพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบว่ามีน้ำระเหยออกจากตัวอย่างหรือไม่ การสูญเสียน้ำหนักต้องไม่เกินร้อยละ 0.05 ของน้ำหนักเริ่มต้น เก็บตัวอย่างไว้ในห้องควบคุมที่มีอุณหภูมิ $28 \pm 1^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ± 5 ตลอดการทดสอบ

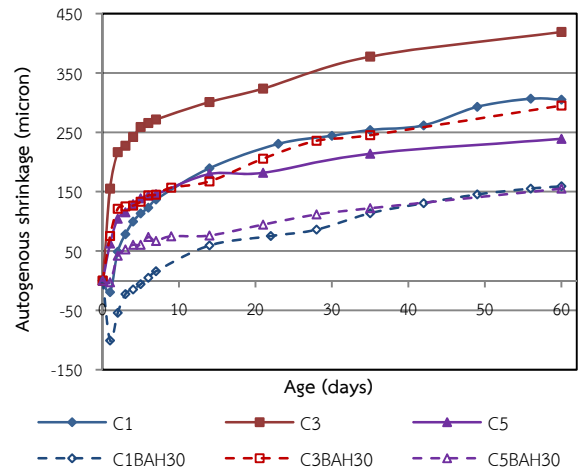
4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การหดตัวของมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

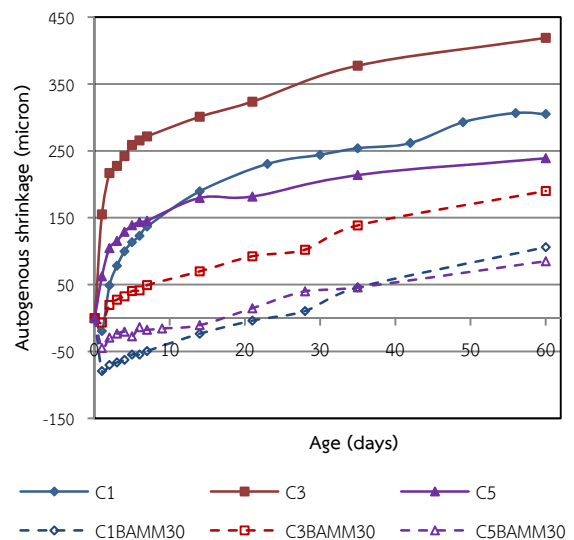
ผลทดสอบค่าการหดตัวแบบอโตจีนิสของมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ต่างชนิดกัน แสดงดังรูปที่ 4 และ 5 จากผลการทดสอบพบว่ามอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 มีการหดตัวมากที่สุดและรองลงมาคือ มอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ตามลำดับ เนื่องจากการหดตัวแบบอโตจีนิสเกิดจากการสูญเสียน้ำจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 มีความละเอียดสูงที่สุด จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้การหดตัวมีค่าสูงตามไปด้วย ในกรณีของมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 พบว่าการหดตัวในช่วงแรกสูงกว่ามอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทีเดียว ที่มีค่า C_3A และ C_3S ต่ำกว่า ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และ C_3S สูง จะทำให้การหดตัวแบบอโตจีนิสสูงตามไปด้วย [12, 13] การที่ผลการทดลองในงานวิจัยนี้แตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาอาจเกิดเนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ใช้ในการวิจัยนี้มีความละเอียดสูงกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 16% หรืออาจกล่าวได้ว่า สำหรับปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ความละเอียดของปูนซีเมนต์มีผลต่อการหดตัวแบบอโตจีนิสของมอร์ต้ามากกว่าผลของ C_3A และ C_3S

จากรูปที่ 4 และ 5 พบว่าการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด ทำให้การหดตัวแบบอโตจีนิสของมอร์ต้าลดลง โดย BMM ลดการหดตัวได้มากกว่า BAH เนื่องจากการหดตัวแบบอโตจีนิสเกิดจากการสูญเสียน้ำในช่องว่างคาปิลลารีจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นหากมีน้ำอิสระเพิ่มขึ้นก็จะทำให้การหดตัวลดลง โดยน้ำที่กักเก็บอยู่ในรูพรุนของเถ้าก้นเตาจะค่อยๆ ถูกนำมาใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างช้าๆ นอกจากนี้ น้ำที่ปลดปล่อยออกมาจากเถ้าก้นเตายังทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในช่องว่างคาปิลลารีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ แรงดันคาปิลลารี (Capillary Suction) ที่เกิดขึ้นในช่องว่างคาปิลลารีลดลง เถ้าก้นเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำสูงสามารถปลดปล่อยน้ำออกมาได้มากและยาวนานกว่า เถ้าก้นเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำต่ำ การหดตัวแบบอโตจีนิสจึงเกิดขึ้นน้อยลง

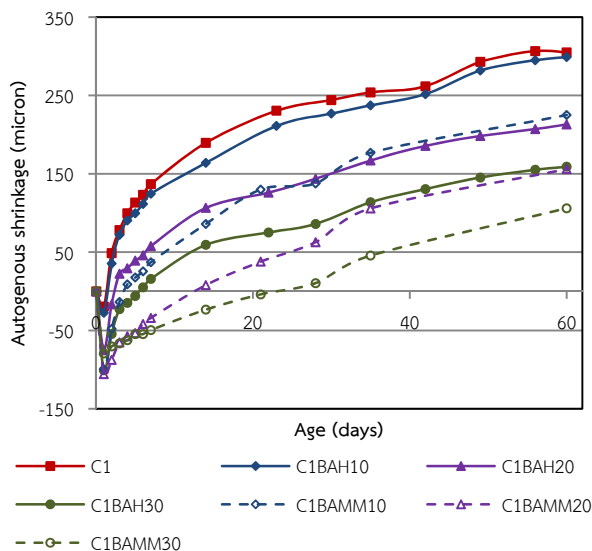
รูปที่ 6 แสดงผลของชนิดและปริมาณของเถ้าก้นเตา ต่อการหดตัวแบบอโตจีนิสของมอร์ต้า จากผลการทดลองพบว่าการหดตัวลดลงตามปริมาณของเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น โดย BMM ลดการหดตัวได้มากกว่า BAH ในทุกปริมาณการใช้ ซึ่งนอกจากจะเกิดจากสาเหตุที่อธิบายข้างต้นแล้ว ยังพบว่าการใช้เถ้าก้นเตาทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวในช่วงแรกได้มากกว่ามอร์ต้าที่ไม่ใช้เถ้าก้นเตา การขยายตัวในช่วงต้นนี้จะชดเชยการหดตัวที่เกิดขึ้นภายหลัง นอกจากนี้ น้ำที่ปลดปล่อยออกมายังช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์แน่นและแข็งแรงขึ้น การหดตัวจึงมีค่าลดลง [8,14]



รูปที่ 4 การหดตัวแบบอโตจีนิสของมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุประสานและใช้เถ้าก้นเตา BAH ร้อยละ 30 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด



รูปที่ 5 การหดตัวแบบอโตจีนิสของมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุประสานใช้เถ้าก้นเตา BMM ร้อยละ 30 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด



รูปที่ 6 การหดตัวของมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานและใช้เถ้าก้นเตา BAH และ BAMM ร้อยละ 10, 20, 30 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด

4.2 การหดตัวของมอร์ต้าที่ใช้วัสดุประสานร่วมสองชนิด

ผลทดสอบการหดตัวของมอร์ต้าที่ใช้วัสดุประสานร่วมสองชนิดได้แก่ ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตาในปริมาณที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 7 และ 8 จากผลการทดสอบพบว่า การใช้วัสดุประสานร่วมสองชนิด ช่วยลดการหดตัวของมอร์ต้า เนื่องจากการใช้เถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง การสูญเสียน้ำในช่องว่างคาพิลลารี จึงลดลงตามไปด้วย อีกทั้งการใช้เถ้าลอยทำให้ปริมาณน้ำอิสระในคอนกรีตเพิ่มขึ้นการหดตัวจึงลดลง นอกจากนี้มอร์ต้าที่ผสมเถ้าลอย (C1FA30) จะมีการขยายตัวในช่วงแรกมากกว่ามอร์ต้าที่ไม่ผสมเถ้าลอย (C1) การขยายตัวในช่วงแรกนี้จะชดเชยการหดตัวที่เกิดขึ้นภายหลัง จึงทำให้การหดตัวของมอร์ต้าลดลง ซึ่งการขยายตัวนี้เป็นผลมาจาก SO_3 ในเถ้าลอย

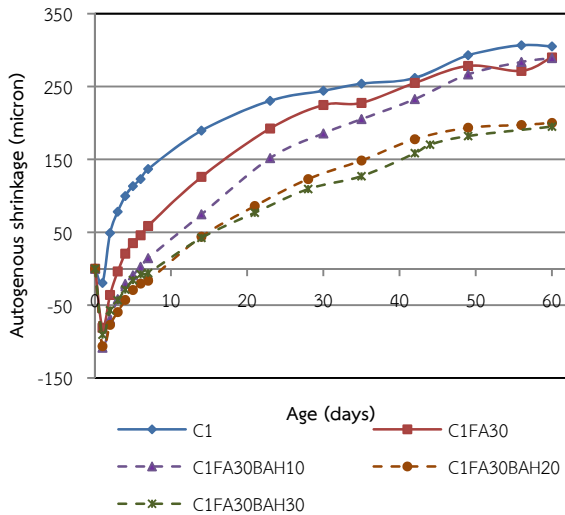
รูปที่ 7 แสดงผลการหดตัวของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยที่ใช้เถ้าก้นเตา BAH เทียบกับมอร์ต้าผสมเถ้าลอยที่ไม่ใช้เถ้าก้นเตา จากผลการทดลองพบว่าการใช้เถ้าก้นเตา BAH ร้อยละ 10 (C1FA30BAH10) ทำให้การหดตัวในช่วงต้น (อายุน้อยกว่า 50 วัน) ของมอร์ต้าลดลง แต่ในระยะยาวพบว่ามอร์ต้ามีแนวโน้มใกล้เคียงกับมอร์ต้าผสมเถ้าลอยที่ไม่ใช้เถ้าก้นเตา (C1FA30) ส่วนมอร์ต้าผสมเถ้าลอยที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 20 และ 30 พบว่ามีการหดตัวน้อยกว่ามอร์ต้าผสมเถ้าลอยที่ไม่ใช้เถ้าก้นเตา (C1FA30) ร้อยละ 31 และ 33 ตามลำดับ (ที่อายุ 60 วัน)

รูปที่ 8 แสดงผลการหดตัวของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยที่ใช้เถ้าก้นเตา BAMM เทียบกับมอร์ต้าผสมเถ้าลอยที่ไม่ใช้เถ้าก้นเตา จากผล

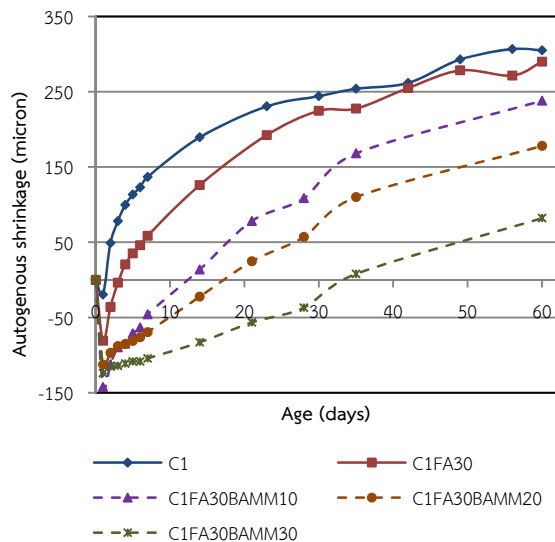
การทดลองพบว่าการใช้เถ้าก้นเตา BAMM ทำให้การหดตัวลดลงตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าก้นเตาที่มีน้ำกักเก็บอยู่ในรูพรุนสามารถปลดปล่อยน้ำจากรูพรุนของเถ้าก้นเตาออกสู่บริเวณใกล้เคียง ส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ในช่องว่างคาพิลลารีเพิ่มขึ้นการหดตัวของมอร์ต้าจึงเกิดขึ้นน้อยลง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการขยายตัวในช่วงแรก (อายุน้อยกว่า 7 วัน) ของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าก้นเตาเป็นส่วนผสม จากรูปที่ 7 และ 8 พบว่า มอร์ต้าที่ใช้เถ้าก้นเตามีการขยายตัวมากกว่ามอร์ต้าที่ไม่ใช้เถ้าก้นเตา แสดงให้เห็นว่าน้ำและรูพรุนในเถ้าก้นเตาส่งผลต่อการขยายตัวในช่วงแรกของมอร์ต้าอย่างมีนัยสำคัญ และการขยายตัวนี้จะชดเชยการหดตัวที่เกิดขึ้นภายหลัง จึงทำให้การหดตัวของมอร์ต้าลดลง

รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการหดตัวของเถ้าก้นเตา ทั้งในมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และในมอร์ต้าที่ใช้วัสดุประสานร่วมสองชนิด เมื่อพิจารณาการหดตัวของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าก้นเตาต่างชนิดกัน พบว่ามอร์ต้าที่ใช้เถ้าก้นเตา BAMM ซึ่งมีค่าการกักเก็บน้ำสูง ($WR=29.6\%$) มีการหดตัวต่ำกว่ามอร์ต้าที่ใช้เถ้าก้นเตา BAH ซึ่งมีค่าการกักเก็บน้ำต่ำกว่า ($WR=18.8\%$) เนื่องจากเถ้าก้นเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำสูง สามารถเก็บน้ำไว้ในรูพรุนได้มากกว่า ส่งผลให้มีน้ำที่สามารถเพิ่มความชื้นให้กับช่องว่างคาพิลลารีได้มากและยาวนานกว่าการใช้เถ้าก้นเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำต่ำ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการขยายตัวในช่วง 7 วันแรก จากรูปที่ 4 ถึง 8 พบว่าเมื่อปริมาณน้ำโดยรวมที่ถูกกักเก็บในเถ้าก้นเตาเพิ่มขึ้น จะทำให้มอร์ต้ามีการขยายตัวได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้พบได้ทั้งในมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และในมอร์ต้าผสมเถ้าลอย

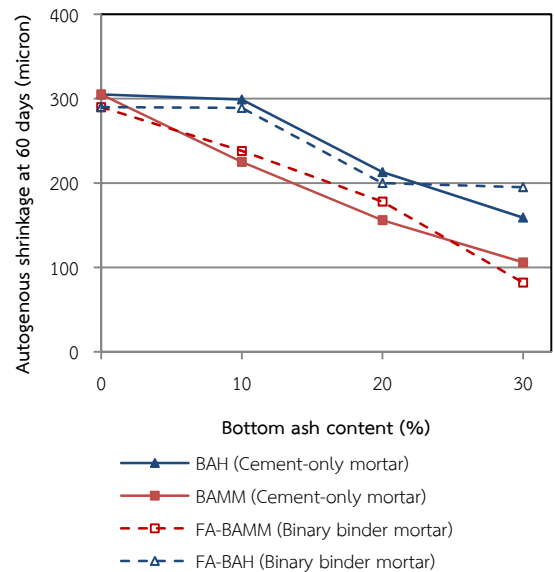
เมื่อเปรียบเทียบการหดตัวของมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน อายุ 60 วัน ในส่วนผสมที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 9 พบว่า การใช้เถ้าก้นเตาในมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน มีประสิทธิภาพในการลดการหดตัวของมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนใกล้เคียงกับการใช้เถ้าก้นเตาในมอร์ต้าที่ใช้วัสดุประสานสองชนิด (ปูนซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอย) และมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้วัสดุประสานร่วมสองชนิดที่ไม่มีการใช้เถ้าก้นเตาในส่วนผสม



รูปที่ 7 การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอยเป็นวัสดุประสานและใช้เถ้าก้นเตา BAH ร้อยละ 10, 20, 30 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด



รูปที่ 8 การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นวัสดุประสานและใช้เถ้าก้นเตา BAMM ร้อยละ 10, 20, 30 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด



รูปที่ 9 การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าที่อายุ 60 วัน

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัย สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การใช้เถ้าก้นเตาช่วยลดการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งในการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1, 3 และ 5
- 2) การใช้เถ้าก้นเตาช่วยลดการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าที่ใช้วัสดุประสานร่วมสองชนิด (ปูนซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอย) โดยการหดตัวมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น
- 3) การใช้เถ้าก้นเตาในมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน มีประสิทธิภาพในการลดการหดตัวแบบออโตจีนัสใกล้เคียงกับการใช้เถ้าก้นเตาในมอร์ต้าที่ใช้วัสดุประสานสองชนิด (ปูนซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอย)
- 4) ค่าการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตามีผลกระทบต่อหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้า โดยเถ้าก้นเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำสูงช่วยลดการหดตัวได้มากกว่าเถ้าก้นเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำต่ำ
- 5) เมื่อปริมาณน้ำโดยรวมที่ถูกกักเก็บในเถ้าก้นเตาเพิ่มขึ้น จะทำให้มอร์ต้ามีการขยายตัวได้เพิ่มมากขึ้น และขดเคียวการหดตัวที่เกิดขึ้นภายหลัง ซึ่งปรากฏการณ์นี้พบได้ทั้งในมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และในมอร์ต้าผสมเถ้าลอยที่ใช้เถ้าก้นเตาเป็นส่วนผสม

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และโครงการส่งเสริมการผลิตงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ที่สนับสนุนการดำเนินงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Bucholc and N. Ghafoori, "Investigation of lignite-based bottom ash for structural concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineer, 8(3), pp 128-137, 1996.
- [2] N. Ghafoori and J. Bucholc, "Properties of high-calcium dry bottom ash concrete", *ACI Material Journal* 94(2), pp. 90-101, 1997.
- [3] N. Ghgafoori and Y. Cai, "Laboratory-made roller compacted concretes containing dry bottom ash: Part I – Mechanical properties", *ACI Material Journal*, 95(2), pp. 121-130, 1998.
- [4] D.P. Bentz and K.A. Snyder, "Protected paste volume in concrete – Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate", *Cement and Concrete Research*, Vol.29, pp.1863-1867, 1999.
- [5] Y. Bai, F. Darcy and P.A.M. Basheer, "Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate", *Construction and Building Materials*, Vol. 19, pp. 691-697, 2005.
- [6] I. Yüksel, and A. Genc, "Properties of concrete containing nonground ash and slag as fine aggregate", *ACI Materials Journal*, 104(4), pp. 397-403, 2007.
- [7] A. Durán-Herrera, P. Claude-Aïtcin, and N. Petrov, "Effect of Saturated Lightweight Sand Substitution on Shrinkage in 0.35 w/b Concrete", *ACI Material Journal*, 104(6), 2007.
- [8] D. Cusson and T. Hoogeveen, "Internal curing of high-performance concrete with pre soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking", *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, pp. 757-765, 2008.
- [9] L.B. Andrade, J.C. Rocha and M. Cheriaf, "Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 609-614, 2009.
- [10] K. Shi-Cong and P. Chi-Sun, "Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates", *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 2877-2886, 2009.
- [11] R. Kasemchaisiri and S. Tangtermsirikul, "A method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 1322-1334, 2007.
- [12] E. Tazawa and S. Miyazawa, "Autogenous Shrinkage of Concrete and Its Importance in Concrete Technology", *Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium*, Barcelona, Spain, 1993, pp. 189-168.
- [13] H. Justnes, E.J. Sellevold, B. Reyniers, D. Van Loo, A. Van Gemert, F. Verboven and D. Van Gemert, "The Influence of Cement Characteristics on Chemical Shrinkage", *Proceeding of the International Workshop organized by JCI (Japan Concrete Institute) on Autogenous Shrinkage of Concrete*, Hiroshima, Japan, 1998, pp. 71-80.
- [14] K. Kohn, T. Okamoto, Y. Isikawa, T. Sibata and H. Mori, "Effect of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 611-615, 1999.