



Journal of Thailand Concrete Association วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

EFFECT OF FLY ASH, LIMESTONE POWDER AND BOTTOM ASH ON SHRINKAGE CRACKING BEHAVIOR OF CONCRETE

ผลของเถ้าลอย ผงหินปูน และเถ้าก้นเตาต่อพฤติกรรมการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของ
คอนกรีต

มนตรี คงสุข¹ สรรณกร เหมะวิบูลย์² สนธยา ทองอรุณศรี^{3,*} สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล⁴

^{1, 2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จ.พิษณุโลก

³ สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี

⁴ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ARTICLE INFO:

Received: December 16, 2016

Received Revised Form:

January 4, 2017

Accepted: January 13, 2016

ABSTRACT:

This research was aimed to study the cracking behavior under restrained shrinkage condition of concrete containing fly ash, limestone powder and bottom ash. The bottom ash was used as an internal curing material. The cracking behaviors of concrete that were studied in this research consist of the cracking age of concrete under the uniaxially restrained shrinkage test, free shrinkage, tensile strength and compressive strength of concrete. In this study, the weight percentages of replacement of cement by fly ash were 0, 30 and 50%. For limestone powder, the replacement percentages were 0, 10%. The volume percentages of replacement of fine aggregate by the bottom ash were 10 and 30%. The water to binder ratio of 0.55 was used in this investigation. The results indicated that the use of fly ash could reduce the shrinkage while the shrinkage of limestone powder concrete slightly increased. The use of fly ash and limestone powder increased the cracking age of concrete. Moreover, the cracking age of concrete increases with the increase of fly ash content. The use of bottom ash as internal curing can reduce autogenous shrinkage and can increase cracking age of concrete. The compressive strength reduces with increase of fly ash and bottom ash content.

KEYWORDS: Cracking, Shrinkage, Fly ash, Limestone powder, Bottom ash

บทคัดย่อ :

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวที่ถักยึดรั้งของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา โดยจะใช้เถ้าก้นเตาในรูปของการเป็นวัสดุบ่มภายใน พฤติกรรมการแตกร้าวที่ศึกษา ได้แก่ การหดตัวแบบอิสระ กำลังดึง กำลังอัด อายุการแตกร้าว โดยใช้ส่วนผสมที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราร้อยละ 0, 30 และ 50

*Corresponding Author,

Email address: sontaya@rmutl.ac.th

โดยน้ำหนัก แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนในอัตราร้อยละ 0 และ 10 โดยน้ำหนัก และใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 จากผลการทดสอบพบว่า เถ้าลอยช่วยลดการหดตัวของคอนกรีต ในขณะที่การหดตัวของคอนกรีตผสมผงหินปูนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย การใช้เถ้าลอยและผงหินปูนช่วยเพิ่มอายุการแตกร้าวของคอนกรีต โดยอายุการแตกร้าวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น การใช้เถ้าก้นเตาในรูปของวัสดุบ่มภายในช่วยลดการหดตัวแบบบอโตจีนัสของคอนกรีต และช่วยยืดอายุการแตกร้าวของคอนกรีต ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: การแตกร้าว, การหดตัว, เถ้าลอย, ผงหินปูน, เถ้าก้นเตา

1. บทนำ

การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีตเป็นปัญหาหนึ่งของโครงสร้างคอนกรีต เนื่องจากการแตกร้าวมียผลต่อ ความคงทน ความมั่นคง และความสวยงามของโครงสร้าง [1-3] การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีตมีกลไกการเกิดที่ซับซ้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ปริมาณการหดตัวแบบอิสระ (Free shrinkage) อัตราการหดตัว (Shrinkage rate) การคืบตัว (Creep) เงื่อนไขการยึดรั้ง (Condition of restraint) โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) และความสามารถในการยืดตัวจากแรงดึง (Tensile strain capacity) หรือกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต [2,4] การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวเกิดขึ้นเนื่องจากในขณะที่คอนกรีตกำลังหดตัวภายใต้การยึดรั้งจะเกิดหน่วยแรงดึงขึ้นภายในคอนกรีต หากหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตหรือความเครียดดึงสูงกว่าความสามารถในการยืดตัวจากแรงดึง จะทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว [5-7] การแตกร้าวของคอนกรีตส่วนหนึ่งมักเกิดขึ้นในช่วงอายุต้นเนื่องจากคอนกรีตในช่วงอายุต้นมีอัตราการหดตัวที่สูงประกอบกับคอนกรีตยังมีกำลังต่ำจึงทำให้มีความเสี่ยงต่อการแตกร้าวได้ง่าย [7] การหดตัวของคอนกรีตเกิดจากการสูญเสียน้ำภายในช่องว่างของคอนกรีต โดยน้ำบางส่วนถูกดึงไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน และอีกส่วนหนึ่งจะระเหยไปสู่สภาวะแวดล้อมภายนอก ดังนั้นการบ่มคอนกรีตจึงมีความสำคัญอย่างมาก[8]เพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง ที่ผ่านมามีการนำวัสดุผสมเพิ่มมาปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านต่างๆ ให้ดีขึ้น โดยเฉพาะในการช่วยลดการหดตัวของคอนกรีต วัสดุผสมเพิ่มที่นิยมใช้ ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash, FA) และผงหินปูน (Limestone Powder, LP) โดยใช้แทนที่

ปูนซีเมนต์บางส่วน [8-10] นอกจากนี้ยังเริ่มมีการศึกษาการใช้เถ้าก้นเตา (Bottom Ash, BA) เพื่อนำมาเป็นวัสดุบ่มภายใน (Internal curing) โดยนำมาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน เพื่อช่วยในเรื่องการบ่มและลดการหดตัวของคอนกรีต [11-13]

การนำวัสดุต่างๆ เหล่านี้มาใช้ในงานคอนกรีตจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติด้านการแตกร้าวของคอนกรีต แต่ที่ผ่านมายังมีการศึกษาในเรื่องนี้ไม่มากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของเถ้าลอย ผงหินปูน และเถ้าก้นเตาต่อพฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีต โดยศึกษาการหดตัวแบบอิสระ กำลังดึง กำลังอัด และอายุการแตกร้าว

2. ระเบียบวิธีวิจัย

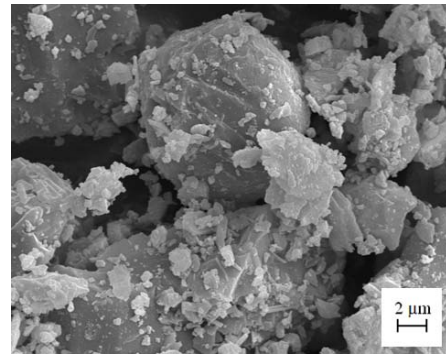
2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ผงหินปูน เถ้าลอย เถ้าก้นเตา หินหยาบ และมวลรวมหยาบที่เป็น หินปูน องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย ผงหินปูนและเถ้าก้นเตา แสดงดังตารางที่ 1 เถ้าลอยและเถ้าก้นเตาที่ใช้ในการทดลองนำมาจาก โรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ซึ่งเถ้าลอยและเถ้าก้นเตามีองค์ประกอบทางเคมีไม่แตกต่างกันมากนัก แต่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันมาก อนุภาคของเถ้าก้นเตามีลักษณะพรุน ไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้สามารถกักเก็บน้ำได้ดี เถ้าก้นเตามีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับเถ้าลอย โดยมีขนาดใกล้เคียงกับทรายหยาบ ค่าการกักเก็บน้ำ (Water retrainability, WR) ของเถ้าก้นเตาในงานวิจัยนี้ทดสอบตามวิธีของ Kasemchaisiri และ Tangtermsirikul [13] เถ้าก้นเตาที่ใช้มีความสามารถในการกักเก็บ

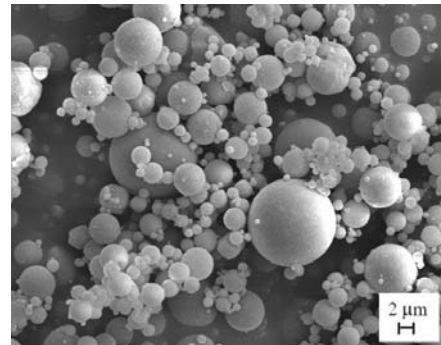
น้ำเท่ากับ 29.51 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.92 ผงหินปูนที่ใช้ นำมาจากบริษัทสุรินทร์ ออมย่า เคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเท่ากับ 5 ไมครอน ลักษณะอนุภาคของ ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย ผงหินปูน และเถ้ากันเตา แสดงดังรูปที่ 1 ถึง รูปที่ 4 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าปูนซีเมนต์และผงหินปูน มีลักษณะเป็น เหลี่ยมมุม เนื่องจากวัสดุทั้งสองชนิดต้องผ่านการบด ในขณะที่เถ้า ลอยมีลักษณะเป็นทรงกลม ส่วนเถ้ากันเตามีลักษณะเป็นเหลี่ยม มุมและพรุนมาก ลักษณะอนุภาคของวัสดุเหล่านี้ส่งผลต่อสมบัติ ของคอนกรีต โดยเฉพาะในขณะที่เป็นคอนกรีตสด มวลรวม ละเอียดที่ใช้ คือ หทรายแม่น้ำ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.59 มี โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.62 มวลรวมหยาบที่ใช้คือ หินปูน ย่อย มีขนาดโตสุดของหินเท่ากับ 19 มิลลิเมตรและมีค่าความ ถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.70

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เถ้าลอยผงหินปูน และเถ้ากันเตา

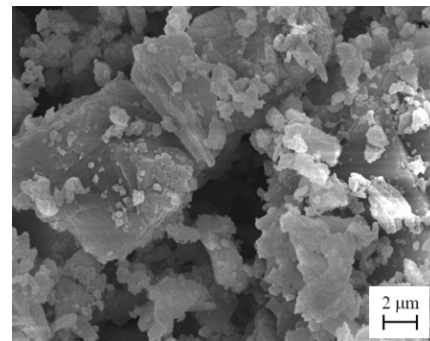
Chemical and Physical Properties		OPC (%)	FA(%)	LP (%)	BA (%)
Chemical Compositions (%)	SiO ₂	19.87	39.40	3.25	47.45
	Al ₂ O ₃	4.87	17.93	1.50	20.32
	Fe ₂ O ₃	3.55	12.92	1.28	10.92
	CaO	65.03	19.19	65.40	13.16
	MgO	2.52	2.99	1.32	2.60
	SO ₃	0.73	3.03	-	1.16
	Na ₂ O	0.02	1.36	-	1.03
	K ₂ O	0.45	2.50	0.26	2.70
	L.O.I.	2.26	0.17	26.15	3.11
Physical Properties	Blaine Fineness (cm ² /g)	3350	2836	-	-
	Specific gravity	3.13	2.28	2.74	1.92



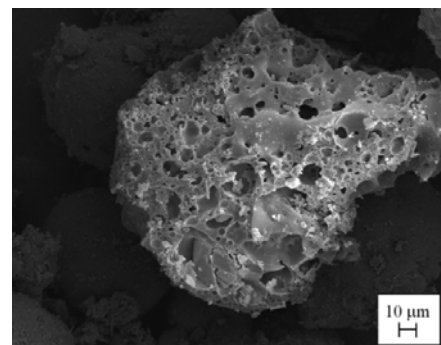
รูปที่ 1 ภาพกล้องจุลทรรศน์ของปูนซีเมนต์ (3000x)



รูปที่ 2 ภาพกล้องจุลทรรศน์ของเถ้าลอย (1500x)



รูปที่ 3 ภาพกล้องจุลทรรศน์ของผงหินปูน (3000x)



รูปที่ 4 ภาพกล้องจุลทรรศน์ของเถ้ากันเตา (350x)

2.2 ส่วนผสมของคอนกรีต

การศึกษาผลของเถ้าลอย ผงหินปูน และเถ้าก้นเตาต่อพฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และใช้อัตราส่วนปริมาตรเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่น เท่ากับ 1.4 เท่ากันทุกส่วนผสม เถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วน ในขณะที่เถ้าก้นเตาใช้แทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนร้อยละ 0 และ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่วนเถ้าก้นเตาใช้แทนที่ในมวลรวมละเอียดร้อยละ 0, 10 และ 30 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด ส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษามีทั้งสิ้น 6 ส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 2 และตารางที่ 3

2.3 วิธีการทดลอง

การศึกษาพฤติกรรมการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต ได้ทดสอบการหดตัวแบบอิสระ กำลังดึง กำลังอัด และอายุการแตกร้าวของคอนกรีต ขั้นตอนการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5 ถอดแบบเมื่อคอนกรีตมีอายุ 1 วัน หลังจากนั้นตัวอย่างคอนกรีตที่ถูกยึดครั้งแรกหดตัวจะบ่มด้วยความชื้น โดยการหุ้มด้วยกระดาษหนังสือพิมพ์เปียกและพลาสติกใสเป็นเวลา 6 วัน ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 28 ± 1 องศาเซลเซียส และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ± 5 ตลอดการทดสอบ งานวิจัยนี้ประกอบด้วยวิธีการทดลองย่อย 3 การทดลอง ได้แก่ 1) การหดตัวแบบอิสระ 2) กำลังอัดและกำลังดึง และ 3) อายุการแตกร้าว ซึ่งการทดลองแต่ละการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 การหดตัวแบบอิสระ

การหดตัวแบบอิสระของคอนกรีตในงานวิจัยนี้หมายถึงการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ซึ่งเป็นผลรวมของการหดตัวแบบ

ออโตจีนิสและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต การทดสอบการหดตัวของคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C157 โดยใช้ตัวอย่างรูปทรงปริซึมสี่เหลี่ยมขนาด $7.5 \times 7.5 \times 28.5$ เซนติเมตร ในแต่ละส่วนผสมใช้ จำนวน 4 ตัวอย่าง เริ่มทดสอบการหดตัวเมื่อคอนกรีตมีอายุ 1 วัน จนกระทั่งคอนกรีตอายุครบ 30 วันหรือจนกระทั่งตัวอย่างคอนกรีตที่ถูกยึดครั้งแรกหดตัวเกิดการแตกร้าวจึงสิ้นสุดการทดสอบการหดตัวของคอนกรีต

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบส่วนผสมคอนกรีต

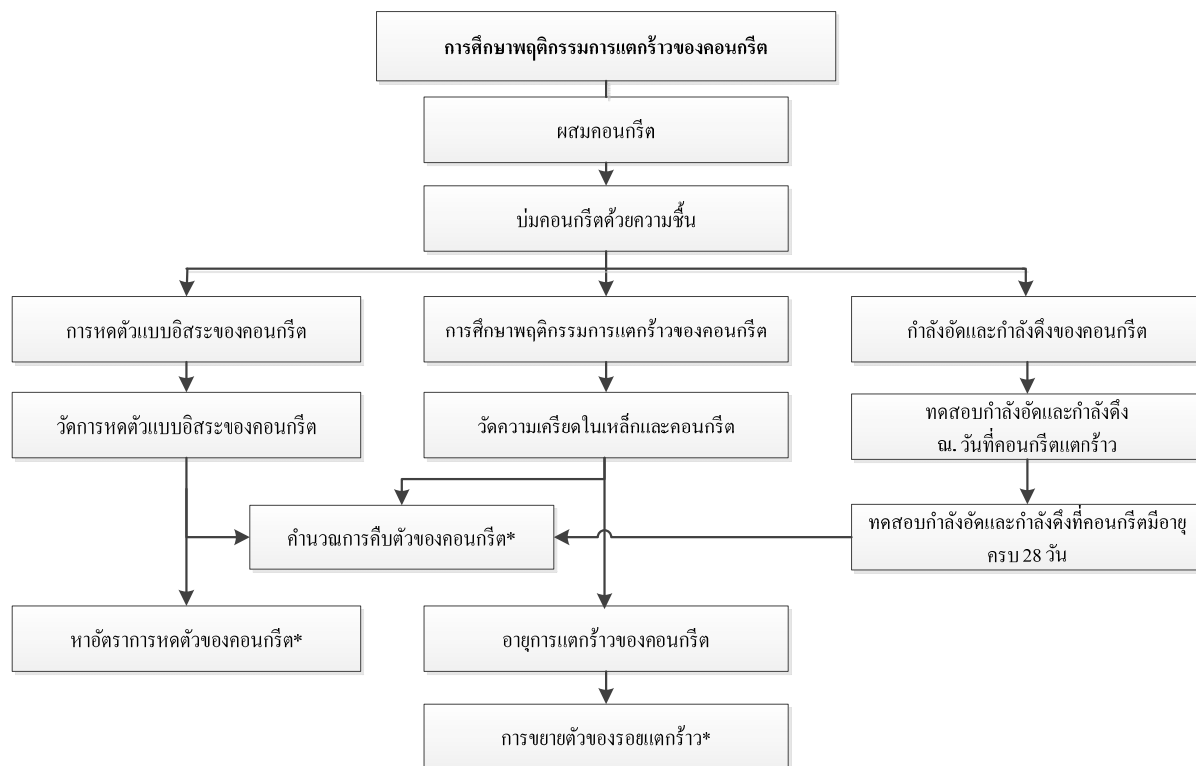
Mix designation	w/b	C (%)	FA (%)	LP (%)	BA (%)
w55r0	0.55	100	0	0	0
w55r10LP	0.55	90	0	10	0
w55r30FA	0.55	70	30	0	0
w55r50FA	0.55	50	50	0	0
w55r10BA	0.55	100	0	0	10
w55r30BA	0.55	100	0	0	30

หมายเหตุ : OPC, FA, LP, BA และ w/b คือ ปูนซีเมนต์, เถ้าลอย, ผงหินปูน, เถ้าก้นเตา และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานตามลำดับ

ตารางที่ 3 สัดส่วนส่วนผสมคอนกรีตโดยน้ำหนักต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต

Mix designation	w/b	Unit content (kg/m ³)						
		C	FA	LP	W	BA	S	G
w55r0	0.55	372	-	-	202	-	726	1044
w55r10LP	0.55	333	-	37	201	-	726	1044
w55r30FA	0.55	250	107	-	194	-	726	1044
w55r50FA	0.55	174	174	-	189	-	726	1044
w55r10BA	0.55	372	-	-	200	56	653	1044
w55r30BA	0.55	372	-	-	196	167	508	1044

หมายเหตุ : C, FA, LP, W, BA, S และ G คือ ปูนซีเมนต์, เถ้าลอย, ผงหินปูน, น้ำ, เถ้าก้นเตา, ทราย และหิน ตามลำดับ



หมายเหตุ : * ไม่ได้ครอบคลุมในบทความนี้

รูปที่ 5 ขั้นตอนการทดลอง

2.3.2 กำลังอัดและกำลังดึง

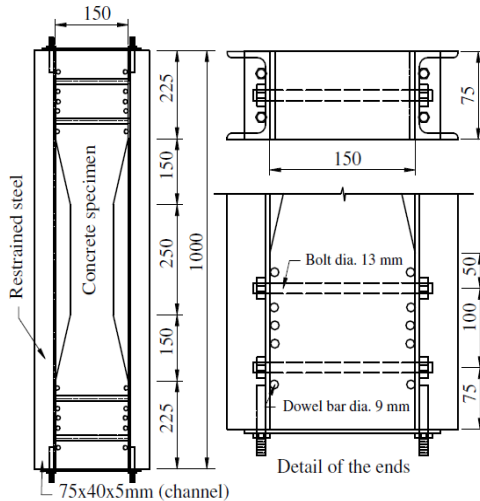
การทดสอบกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร ในแต่ละการทดสอบใช้จำนวน 3 ตัวอย่าง การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 และการทดสอบกำลังดึงเป็นการทดสอบแบบปริแยกของทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C496 การทดสอบกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตทดสอบทั้งหมด 2 อายุ โดยจะทดสอบเมื่อคอนกรีตที่ถูกยึดรั้งการหดตัวเกิดการแตกร้าวและทดสอบเมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 28 วัน

2.3.3 อายุการแตกร้าว

อายุการแตกร้าวของคอนกรีตใช้สำหรับเปรียบเทียบโอกาสการเกิดการแตกร้าวของคอนกรีตที่มีส่วนผสมแตกต่างกัน โดยส่วนผสมที่มีอายุการแตกร้าว น้อย แสดงว่ามีโอกาสเกิดการแตกร้าวได้ง่ายกว่าส่วนผสมที่มีอายุการแตกร้าวมาก อายุการแตกร้าวของคอนกรีตทดสอบโดยใช้ชุดทดสอบการยึดรั้งการหดตัว

ของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 6 ชุดการทดสอบการยึดรั้งการหดตัวของคอนกรีตถูกออกแบบเพื่อทำให้เกิดหน่วยแรงดึงหรือความเครียดยึดรั้งภายในคอนกรีต อันเป็นผลมาจากการหดตัวของคอนกรีต ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามการหดตัวที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งหน่วยแรงมีค่ามากกว่ากำลังดึง หรือความเครียดยึดรั้งมีค่ามากกว่าความสามารถในการยึดตัวจากแรงดึง คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวพื้นที่หน้าตัดเหล็กของชุดทดสอบที่ทำหน้าที่ยึดรั้งการหดตัวเท่ากับ 17.64 ตารางเซนติเมตร และหน้าตัดของคอนกรีตบริเวณช่วงกลาง มีขนาด 7.5x7.5 เซนติเมตร พื้นที่หน้าตัดบริเวณช่วงกลางของคอนกรีตจะแคบกว่าด้านปลายทั้งสองด้าน เนื่องจากต้องการให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวในบริเวณดังกล่าวตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในทดสอบการยึดรั้งการหดตัวใช้ 2 ตัวอย่างต่อ 1 ส่วนผสม ตัวอย่างคอนกรีตจะถูกถอดแบบที่อายุ 1 วันและบ่มคอนกรีตหลังจากถอดแบบด้วยความชื้นโดยห่อหุ้มด้วยกระดาษหนังสือพิมพ์เปียกและพลาสติกใสเป็นเวลา 6 วัน เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นภายในก้อนตัวอย่างคอนกรีต หลังจากสิ้นสุดการ

บ่ม คอนกรีตจะถูกปล่อยให้สัมผัสกับอากาศ และเริ่มวัดความเครียดที่เกิดขึ้นทั้งในเหล็กและคอนกรีตด้วยแผ่นวัดความเครียด (Strain gauge) ยาว 0.6 เซนติเมตร และ 9 เซนติเมตร ตามลำดับ และบันทึกค่าความเครียดอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งคอนกรีตเกิดการแตกร้าว ตำแหน่งที่วัดความเครียดในเหล็กและคอนกรีต จะวัดที่บริเวณช่วงกลางของตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 6 ชุดทดสอบการยึดรั้งการหดตัวของคอนกรีต



รูปที่ 7 ตำแหน่งที่วัดความเครียดในคอนกรีตและโครงเหล็ก

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

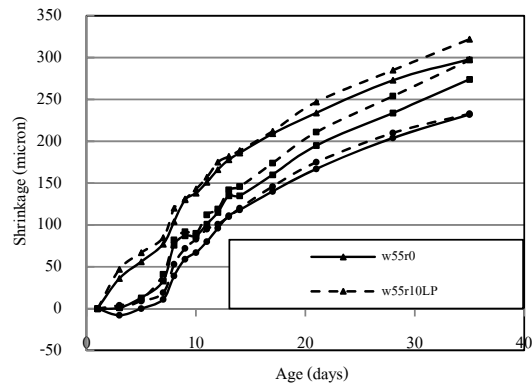
3.1 การหดตัวและอัตราการหดตัว

ผลการทดสอบการหดตัวแบบอิสระ แสดงดังรูปที่ 8 จากผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตผสมผงหินปูนร้อยละ 10 มีแนวโน้มหดตัวมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน เมื่อพิจารณารูปที่ 9 ซึ่ง

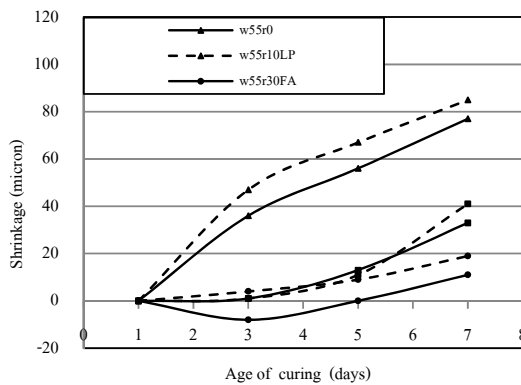
เป็นการหดตัวของคอนกรีตขณะที่ถูกบ่มและน้ำไม่สามารถระเหยออกจากคอนกรีตได้ การหดตัวที่ได้นี้จึงถือว่าเป็นการหดตัวแบบอโตจีนัส แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตผสมผงหินปูนมีการหดตัวแบบอโตจีนัสมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ซึ่งเป็นผลมาจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนที่มีขนาดเล็กและมีพฤติกรรมเป็นวัสดุแทรก (Filler material) ทำให้ช่องว่างคาปิลารีมีขนาดเล็กลง จึงทำให้คอนกรีตมีการหดตัวแบบอโตจีนัสในช่วงอายุต้นสูง และส่งผลให้การหดตัวโดยรวมของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย [3,10] แต่หากพิจารณารูปที่ 10 ซึ่งเป็นการหดตัวที่เกิดขึ้นหลังจากเลิกบ่มและการหดตัวนี้ส่วนใหญ่ถือว่าเป็นการหดตัวแบบแห้ง พบว่าคอนกรีตผสมผงหินปูนมีการหดตัวใกล้เคียงกับการหดตัวของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนและน่าจะมีแนวโน้มที่จะต่ำกว่าในอายุที่มากขึ้น เนื่องจากผงหินปูนช่วยลดการหดตัวแบบแห้ง จากรูปที่ 8 พบว่าการใช้เถ้าลอยช่วยลดการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [2,3,14,15] เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลงส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง และช่วยเพิ่มปริมาณน้ำอิสระในคอนกรีต การหดตัวแบบอโตจีนัสจึงลดลง นอกจากนี้เถ้าลอยมี SO_3 จึงทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวในช่วงแรกดังรูปที่ 9 ซึ่งช่วยลดเขยการหดตัวอิสระของคอนกรีตที่เกิดขึ้นภายหลัง ทำให้การหดตัวโดยรวมลดลง อีกทั้งเถ้าลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยายังทำหน้าที่เสมือนเป็นมวลรวมขนาดเล็ก (Micro Aggregate) ช่วยต้านทานการหดตัวของคอนกรีตได้อีกทางหนึ่ง [2]

จากผลการทดลองดังรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าเถ้าก้นเตาช่วยลดการหดตัวแบบอโตจีนัสของคอนกรีตได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [11-13,16] เนื่องจากเถ้าก้นเตาทำหน้าที่เหมือนเป็นวัสดุบ่มภายในที่สามารถกักเก็บน้ำได้สูง จึงทำให้น้ำที่อยู่ภายในเถ้าก้นเตาสามารถชดเชยน้ำที่สูญเสียไปเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ [11] ประกอบกับเถ้าก้นเตามีเถ้าลอยปะปนอยู่บ้าง จากสาเหตุที่กล่าวมานี้ส่งผลให้คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตามีค่าการหดตัวโดยรวมต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนดังรูปที่ 10 แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาการหดตัวของคอนกรีตหลังจากคอนกรีตที่สัมผัสอากาศ ซึ่งคอนกรีตที่ศึกษามีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 มีการหดตัวแบบอโตจีนัสต่ำและคาดว่าค่าการหดตัวส่วนใหญ่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต จากรูปที่ 10 พบว่าการหดตัวของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนเนื่องมาจากการเพิ่มเถ้าก้นเตาในคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความ

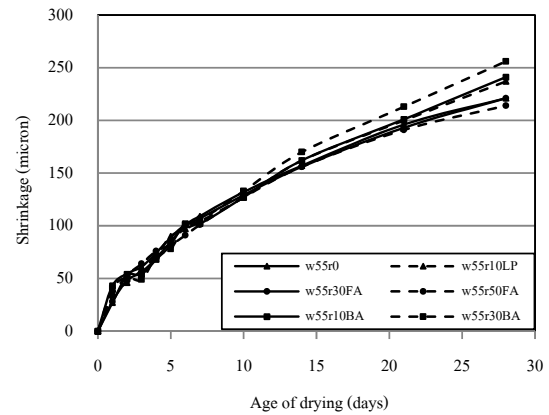
พูนเพิ่มมากขึ้น และมีโอกาสที่จะสูญเสียน้ำไปสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกได้มากกว่า จึงทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้งมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้จึงอาจกล่าวได้ว่า ถ้าวางตัวช่วยลดการหดตัวแบบออโตจีเนียส แต่อาจทำให้การหดตัวแบบแห้งเพิ่มขึ้น



รูปที่ 8 การหดตัวแบบอิสระของคอนกรีต



รูปที่ 9 การหดตัวแบบอิสระในช่วงการบ่มของคอนกรีต



รูปที่ 10 การหดตัวแบบอิสระหลังจากคอนกรีตสัมผัสอากาศ

ตารางที่ 4 อายุการแตกร้าว การหดตัว และกำลังของคอนกรีต

Mix designation	Cracking age (hours)	ϵ_{free} at cracking ($\square$)	F_c (MPa)	F_t (MPa)	F_{c28} (MPa)	F_{t28} (MPa)
w55r0	211	194	22.6	2.6	35.2	3.5
w55r10LP	703	330	29.6	2.8	27.4	3.5
w55r30FA	291	152	23.3	1.9	21.2	2.2
w55r50FA	355	173	15.8	1.3	16.6	1.4
w55r10BA	584	260	34.7	2.9	34.1	2.9
w55r30BA	373	210	31.2	2.8	27.1	2.5

หมายเหตุ : ϵ_{free} , F_c , F_t , F_{c28} และ F_{t28} คือ การหดตัวแบบอิสระ, กำลังอัด ณ.วันที่คอนกรีตแตก, กำลังดึง ณ.วันที่คอนกรีตแตก, กำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน และกำลังดึงของคอนกรีตที่ 28 วัน ตามลำดับ

3.2 กำลังอัดและกำลังดึง

ผลของเถ้าลอย ผงหินปูน และเถ้าก้นเตาต่อกำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน แสดงดังรูปที่ 11 และตารางที่ 4 จากการศึกษาพบว่าวัสดุผสมเพิ่มทั้ง 3 ชนิด ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนหรือเถ้าลอย ทำให้ปูนซีเมนต์มีปริมาณน้อยลง คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีกำลังอัดลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในระยะยาวคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยในปริมาณที่เหมาะสมสามารถมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยได้ สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตา พบว่าคอนกรีตมีกำลังอัดลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [12] เนื่องจากกำลังอัดของคอนกรีตแปรผกผันกับความพรุน และเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูงและมีความแข็งแรงน้อยกว่าทราย ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตาในคอนกรีตจึงทำให้คอนกรีตมีความพรุนเพิ่มขึ้นกำลังอัดจึงมีค่าลดลง ทั้งนี้ในบางการศึกษาพบว่าการใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณที่เหมาะสมแทนที่ทราย โดยคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ สามารถทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นหรือไม่ลดลงได้เช่นกัน [17]

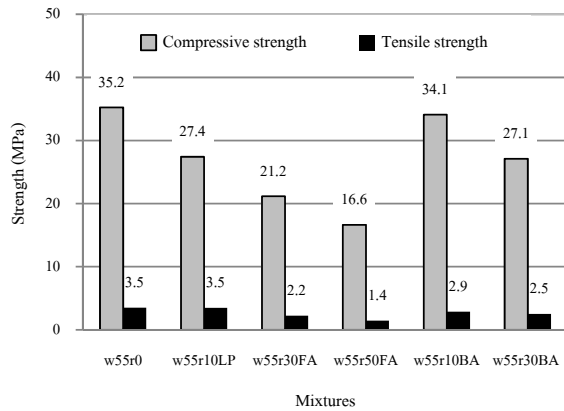
3.3 อายุการแตกร้าว

การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต เป็นผลมาจากเมื่อคอนกรีตเกิดการหดตัวจะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงหรือความเครียดยึดรั้ง (Restrained strain) ในคอนกรีตและหากหน่วยแรงดึงหรือความเครียดยึดรั้ง มีค่ามากกว่ากำลังรับแรงดึงหรือความสามารถในการยืดตัวจากแรงดึงของคอนกรีต คอนกรีตจะเกิด

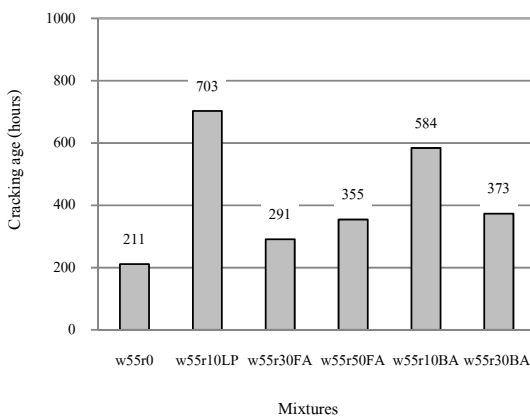
การแตกร้าว จากผลการทดลองดังรูปที่ 12 พบว่าคอนกรีตผสมผงหินปูนมีอายุการแตกร้าวยาวกว่าคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตา คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ตามลำดับ และจากรูปที่ 12 พบว่าผงหินปูนช่วยเพิ่มอายุการแตกร้าวของคอนกรีตได้ถึงแม้ว่าการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตผสมผงหินปูนจะสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

จากผลการทดลองดังรูปที่ 12 พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตามีอายุการแตกร้าวยาวกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน แสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาช่วยลดโอกาสเกิดการแตกร้าวของคอนกรีตได้ ซึ่งอาจเนื่องมาจากค่าการหดตัวโดยรวมและการพัฒนากำลังของทั้งคอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตามีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน จึงทำให้หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน อายุการแตกร้าวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่อายุการแตกร้าวของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตามีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยทำให้การหดตัวของคอนกรีตลดลง จึงทำให้คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 มีอายุการแตกร้าวยาวกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 ในขณะที่การเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตาทำให้การหดตัวมีค่าสูงขึ้น จึงทำให้คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 30 มีอายุการแตกร้าวสั้นกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 เมื่อพิจารณาอายุการแตกร้าวจากรูปที่ 12 ร่วมกับ กำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีต ดังรูปที่ 11, รูปที่ 13 และรูปที่ 14 แสดงให้เห็นว่าการเปรียบเทียบโอกาสเกิดการแตกร้าวของคอนกรีตที่มีส่วนผสมแตกต่างกันไม่สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบจากคุณสมบัติด้านกำลังของคอนกรีตเพียง

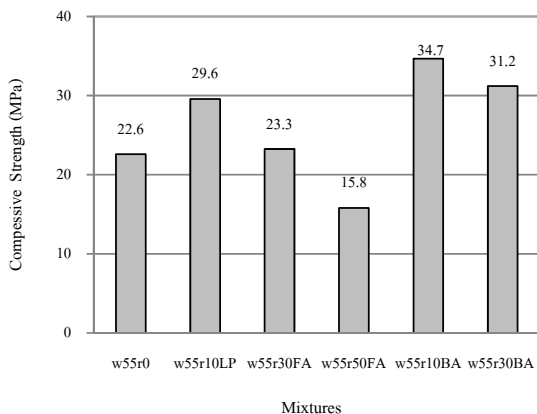
อย่างเดียว จำเป็นต้องอาศัยปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวนมากในการพิจารณา



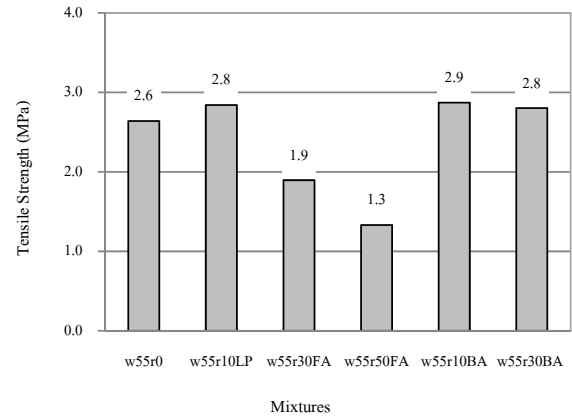
รูปที่ 11 กำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 12 อายุการแตกร้าวของคอนกรีตที่ถูกยึดรั้ง



รูปที่ 13 กำลังอัดของคอนกรีต ณ วันที่คอนกรีตแตก



รูปที่ 14 กำลังดึงของคอนกรีต ณ วันที่คอนกรีตแตก

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 ช่วยลดการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต
- 2) การใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายในปริมาณร้อยละ 10 และ 30 ช่วยลดการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต
- 3) เถ้าลอย ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา ช่วยยืดอายุการแตกร้าวของคอนกรีต
- 4) อายุการแตกร้าวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย แต่อายุการแตกร้าวลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา โครงการส่งเสริมการผลิตผลงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา และ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่สนับสนุนทุนวิจัยและสนับสนุนเครื่องมือในการดำเนินงานนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] E. Holt and M. Leivo, "Cracking risks associated with early age shrinkage," *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, no. 5, pp. 521–530, Jul. 2004.
- [2] S. Tongaroonsri and S. Tangtermsirikul, "Effect of mineral admixtures and curing periods on shrinkage and cracking age under restrained condition," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 2, pp. 1050–1056, Feb. 2009.
- [3] S. Tongaroonsri, S. Hemavibool, W. Saengsoy and S. Tangtermsirikul. "Studies on Autogenous Shrinkage in Binary and Ternary Cement Pastes Containing Fly Ash and Limestone Powder," in *the 4th ACF Int. Conf.* Taipei, Taiwan, 2010.
- [4] Z. Tao and Q. Weizu, "Tensile creep due to restraining stresses in high-strength concrete at early ages," *Cement and Concrete Research*, vol. 36, no. 3, pp. 584–591, Mar. 2006.
- [5] B. Benoit. and P. Michel. "Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concretes." *Cement and Concrete Research*, vol. 25, pp.1075-1085, 1995.
- [6] K. Suzuki , Y. Ohno and T. Nakagawa. "Test method for cracking of concrete due to drying shrinkage." in *Creep and shrinkage of concrete*, E & FN Spon, London, 1993, pp.63-70.
- [7] S.A. Altoubat and D.A. Lange. "Creep, shrinkage, and cracking of restrained concrete at early age." *ACI Material Journal*, vol. 98(4), pp. 323-331, 2001.
- [8] P. Termkhajornkit, T. Nawa, M. Nakai and T. Saito. "Effect of fly ash on autogenous shrinkage." *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 473-482, Mar. 2005.
- [9] W. Zhu and J.C. Gibbs. "Use of limestone and chalk powder in self-compacting concrete." *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 1457-1462, Aug. 2005.
- [10] M. Valcuende, E. Marco, C. Parra and P. Serna. "Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the shrinkage of self-compacting concrete." *Cement and Concrete Research*, vol. 42, pp. 583-592, Apr. 2012.
- [11] S. Tongaroonsri, S. Hemavibool, S. Jaichuy, P. Choktaweekarn and S. Tangtermsirikul. "Effect of Water Retainability of Bottom Ash on Autogenous Shrinkage and Total Shrinkage of Concrete," in *the 5th ACF Int. Conf.*, Chonburi, Thailand, 2012.
- [12] L.B. Topcu and T. Bilir. "Effect of Bottom Ash as Fine Aggregate on Shrinkage Cracking of Mortars." *ACI Material Journal*, vol. 107(1), 2010.
- [13] 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.
- [14] S. Tangtermsirikul. "Effect of chemical composition and particle size of fly ash on autogenous shrinkage of paste," in *Proc. of the international workshop. Autogenous shrinkage of concrete*, 1998, pp. 75-186.
- [15] Q. Hou., K. Wang. and W. Yodsudjai. "A simplified model for prediction of shrinkage behavior of high performance concrete containing supplementary cementitious materials." *Journal of Thailand Concrete Association*, vol. 4(1), pp. 1-10, 2016.
- [16] S. Tongaroonsri, S. Hemavibool, S. Jaichuy, P. Choktaweekarn and S. Tangtermsirikul. "Effect of bottom ash on autogenous shrinkage of binary binder mortar." *Journal of Thailand Concrete Association*, vol. 3(1), pp. 1-8, 2015.
- [17] K. Hussain, P. Choktaweekarn, W. Saengsoy, T. Srichan, and S. Tangtermsirikul. "Effect of Cement Types, Mineral Admixtures and Bottom Ash on Curing Sensitivity of Concrete." *Int. Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, vol. 20(1), pp. 94-105, 2013.