อิทธิพลของส่วนผสมและสภาวะอุณหภูมิบ่มที่มีต่อกำลังรับแรงอัด และการหดตัวแบบแห้งของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยระยอง

Effect of Mix Proportion and Curing Temperature on Compressive Strength and Drying Shrinkage of Cement Paste Containing Rayong Fly Ash

บุรฉัตร ฉัตรวีระ* และ วินัย หอมศรีประเสริฐ

Burachat Chatveera* and Winai Homsriprasert

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต อ.คลองหลวง

จังหวัดปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนผสมและสภาวะอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยระยองที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดและการหดตัวแบบแห้งจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้องกับการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 40°C, 60°C และ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักและบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60°C จะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด ในขณะที่การบ่มที่อุณหภูมิห้องจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่าการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้า สำหรับผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งพบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่บ่มด้วยอุณหภูมิห้องจะมีค่าการหดตัวมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่บ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าโดยค่าการหดตัวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้บ่มเพิ่มสูงขึ้นและนอกจากนี้ยังพบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองจะมีค่า การหดตัวมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยอง

คำสำคัญ: กำลังรับแรงอัด ซีเมนต์เพสต์ เถ้าลอยระยอง การหดตัวแบบแห้ง เตาอบไฟฟ้า

Abstract

This research studies the influence of mix proportion and the optimum point of compressive strength in curing state and drying shrinkage from replacement Rayong fly ash in Portland cement type 1 with Rayong fly ash at replacement percentage 10, 20, 30 and 50 by weight under curing at room temperature and curing with electric oven at 40 °C, 60°C, and 80°C by 24 hours. The results, it found that cement paste with ratio of Rayong fly ash replacement 20 % by weight was providing the highest compressive strength when cured with electric oven curing at 60oC. While the curing at room temperature was giving lower than the compressive strength curing with electric oven. For drying shrinkage test, it was found that cement paste after curing the value of drying shrinkage at room temperature had the higher than the drying shrinkage with electric oven curing, especially drying shrinkage was reducing when cured at high temperature. Moreover, drying shrinkage of cement paste containing Rayong fly ash was higher than cement paste without Rayong fly ash.

Keywords: Compressive strength, Cement paste, Rayong fly ash, Drying shrinkage, Electric oven

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาการผลิตคอนกรีตอย่างกว้างขวางโดยต่างมีวัตถุประสงค์เพื่อคิดค้นหาส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อให้คอนกรีตมีสมบัติที่ดีและแก้ไขข้อบกพร่องบางประการ โดยตัวอย่างที่เห็นได้ชัดที่สุดคือการพัฒนาในเรื่องของกำลังรับแรงอัดและการป้องกันการหดตัวภายใต้ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ อันได้แก่ต้นทุนในการผลิตผนวกกับความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่อย่างไรก็ตามปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ยังคงเป็นวัสดุหลักที่สำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีต ซึ่งจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นได้พิสูจน์ให้เห็นแล้วว่าต้องใช้เชื้อเพลิงและพลังงานสูงมากประมาณ 1,700 – 1,800 MJ. [1-2] ซึ่งในกระบวนการผลิตนี้จะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เกิดขึ้นมากมาย[3-7] เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาเผาปูนซีเมนต์ให้สูงถึง 1,450 องศาเซลเซียส[8] ในการเผาแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) (จากดินขาวหรือหินปูน) เพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตจนได้เป็นปูนเม็ดนั้นพบว่า กระบวนดังกล่าวก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ขึ้น โดยพบว่าทุกๆ 1 ตันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผลิตออกมาจากเตาเผานั้นจะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ถูกปลดปล่อยสู่บรรยายกาศในปริมาณประมาณ 1 ตัน เท่ากันด้วย [9-10] โดยได้มีการสรุปเป็นตัวเลขว่าอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกมาสู่บรรยากาศอยู่ในสัดส่วนประมาณ ร้อยละ 7 ของก๊าซที่ปล่อยออกมาในบรรยากาศทั้งหมด[11-15] ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) นี้เองที่เป็นส่วนสำคัญในการก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect)[16] และเป็นตัวการที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming) ในปัจจุบัน [17-20]

ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการวิจัยพัฒนาคิดค้นส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้น้อยลงโดยการหาวัสดุอื่นมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อผลิตคอนกรีตโดยคุณสมบัติยังคงไม่เปลี่ยนแปลงหรือพัฒนาไปในทิศทางที่ดีขึ้น และหนึ่งในแนวทางนั้น คือการนำเอาวัสดุที่เป็นผลพลอยได้ (By Product) จากภาคอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในทางตรง ส่วนประโยชน์อีกทางหนึ่งคือ เป็นการช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยวัสดุที่นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials) ประเภท เถ้าลอย (Fly Ash) หรือเถ้าถ่านหิน โดยเถ้าลอยถือว่าเป็นวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากถ่านหินซึ่งเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าถ่านหินและปัจจุบันโรงไฟฟ้าถ่านหินมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นซึ่งกระจายอยู่ตามภูมิภาคต่างๆ ของประเทศไทย อย่างไรก็ตามถ่านหินของโรงไฟฟ้าแต่ละแห่งย่อมมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันตามแหล่งกำเนิดและวิวัฒนาการของวัสดุต้นแหล่งจึงส่งผลให้เถ้าลอยที่ได้ย่อมมีคุณภาพแตกต่างกันด้วย ดังนั้นการนำเอาเถ้าลอยแต่ละแหล่งมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาวิจัยถึงสมบัติต่างๆ ของเถ้าลอยก่อนที่จะนำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อผลิตเป็นวัสดุก่อสร้างต่อไป[21-22]

2. วัตถุประสงค์

เพื่อพิจารณาสัดส่วนผสมโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองที่มีผลต่อความต้องการน้ำ ระยะเวลาก่อตัว กำลังรับแรงอัดและการหดตัวแบบแห้งของซีเมนต์เพสต์ภายใต้เงื่อนไขความแตกต่างของอุณหภูมิที่ใช้บ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าและการบ่มที่อุณหภูมิห้อง

3. ขอบเขตการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุผง

วัสดุผงที่ใช้ ได้แก่ เถ้าลอยระยอง ซึ่งนำมาจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน จังหวัดระยอง และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.1.2 น้ำ

สำหรับน้ำที่ใช้ผลิตซีเมนต์เพสต์ ใช้น้ำประปาจากห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

3.2 วิธีการวิจัย

3.2.1 การทดสอบสมบัติของเถ้าลอยระยองและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ประกอบด้วย การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี โดยใช้เทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) ตลอดจนการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) สำหรับสมบัติทางกายภาพ เป็นการวิเคราะห์หาความต้องการน้ำ พื้นที่ผิวจำเพาะ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และดัชนีกำลังสำหรับโครงสร้างทางจุลภาค ทำการศึกษาภาพถ่ายขยายโดยวิธีเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) และการทดสอบเพื่อหาการกระจายขนาดคละของอนุภาคโดยวิธีเทคนิค Particle Size Distribution (PSD)

3.2.2 การทดสอบสมบัติของซีเมนต์เพสต์ในสภาวะสด

ได้แก่ การทดสอบการไหลแผ่ ตามมาตรฐาน ASTM C1437[23] และระยะเวลาก่อตัว ตามมาตรฐาน ASTM C191[24] สำหรับการทดสอบหาความข้นเหลวปกติและระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ ทำได้โดยเตรียมซีเมนต์เพสต์ในอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองดังแสดงในตารางที่ 1 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0.25 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์สำหรับทดสอบการไหลแผ่และระยะเวลาก่อตัว

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	สัดส่วนที่ใช้ (ร้อยละ)	
		ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอยระยอง
1	C100FA0	100	0
2	C90FA10	90	10
3	C80FA20	80	20
4	C70FA30	70	30
5	C50FA50	50	50

สัญลักษณ์ของก้อนตัวอย่างในแต่ละส่วนผสม สามารถอ่านได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

เช่น ก้อนตัวอย่าง C90FA10 หมายถึง ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ในการทดสอบโดยมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อยู่ร้อยละ 90 และมีส่วนผสมของเถ้าลอยระยองอยู่ร้อยละ10

3.2.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิห้องและบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้า

ทำการหล่อตัวอย่างซีเมนต์เพสต์รูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มม.โดยใช้เถ้าลอยระยองแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการถอดแบบหล่อเมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 40°C, 60°C และ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109[25] แล้วนำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบเพื่อหาสัดส่วนผสมของการใช้เถ้าลอยระยองแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีกำลังรับแรงอัดดีที่สุด

3.2.4 การทดสอบเพื่อหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ด้วยเทคนิค TGA

นำตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดแล้วไปทดสอบเพื่อหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) โดยวิเคราะห์จากการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อนด้วยวิธี Thermal Gravimetric Analysis (TGA) ซึ่งเป็นวิธีวัดการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่างๆ โดยทำการวัดหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่คงเหลืออยู่ในซีเมนต์เพสต์ สำหรับช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบคือ ที่อุณหภูมิห้องถึง 600 °C

3.2.5 การทดสอบเพื่อหาค่าการหดตัวแบบแห้ง

ทำการหล่อตัวอย่างซีเมนต์เพสต์รูปทรงปริซึมขนาด 25 x 25 x 285 มม.โดยใช้เถ้าลอยระยองแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการถอดแบบหล่อเมื่อแท่งทดสอบมีอายุครบ 24 ชั่วโมง แล้วนำแท่งซีเมนต์เพสต์ไปแช่น้ำสะอาดเป็นเวลาประมาณ 15 – 30 นาที เพื่อทำการปรับผลต่างอุณหภูมิของแท่งซีเมนต์เพสต์แต่ละแท่ง แล้วนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการวัดความยาวครั้งแรก (L_0) จากนั้นนำแท่งตัวอย่างไปบ่มที่อุณหภูมิห้อง และบ่มในเตาอบไฟฟ้าซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C, 60°C และ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำแท่งตัวอย่างออกมาวัดความยาว (L) โดยใช้เครื่องมือวัดการยืดหดตัว Analog Strain Gauge ตามมาตรฐาน ASTM C 490 [26]

4. ผลการวิจัย

4.1 สมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอยระยอง

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมี

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยระยอง ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าเถ้าลอยระยองมีปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) โดยมวลมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 32.62 ซึ่งถือว่าเป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ปูนขาวอิสระ (Free CaO) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) มีค่าเท่ากับร้อยละ 29.18, 15.77 และ13.15 โดยมวลตามลำดับ

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยระยองและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

Chemical Compositions	% by weight	
	Fly Ash	OPC
SiO_2	32.62	20.66
Al_2O_3	13.15	5.38
Fe_2O_3	5.09	3.32
CaO	29.18	65.20
MgO	2.10	1.39
K_2O	0.95	0.38
Na_2O	0.62	0.07
SO_3	6.11	2.24
Free CaO	15.77	0.50

โดย SiO_2, Fe_2O_3 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบที่ช่วยในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานนิคซึ่งต้องมีไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ในส่วนของ SO_3 นั้น หากเถ้าถ่านหินมีปริมาณ SO_3 มากเกินกว่าร้อยละ 5 อาจทำให้คอนกรีตมีการขยายตัวสูงและเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตได้ง่าย สำหรับค่า LOI ที่สูงมักทำให้คอนกรีตต้องการสารกักกระจายฟองอากาศเพิ่มขึ้นเพื่อทำให้คอนกรีตมีฟองอากาศตามที่ต้องการ (สารกักกระจายฟองอากาศใช้สำหรับคอนกรีตที่อยู่ในสภาพอากาศหนาวถึงหนาวจัดหรือมีอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ LOI ยังเป็นปัจจัยที่ทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำลงด้วย ดังนั้น ASTM C 618 จึงกำหนดไว้ว่าค่า LOI ควรมีได้ไม่เกินร้อยละ 6 ขณะที่ Na_2O และ K_2O มีสมบัติความเป็นด่างที่อาจทำปฏิกิริยากับหินหรือทรายบางชนิดและก่อให้เกิดปัญหาการขยายตัวของคอนกรีตได้ง่ายถ้าหากมีปริมาณที่สูงเกินไป ดังนั้นจึงกำหนดให้ Na_2O และ K_2O มีได้ไม่เกินร้อยละ 1.5 เทียบเท่าของ Na_2O แต่ข้อกำหนดของ Na_2O จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อคาดว่าคอนกรีตจะเกิดปัญหาการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่าง

ด่าง (Na_2O และ K_2O) กับมวลรวมบางชนิดเท่านั้น [27] สำหรับองค์ประกอบทางเคมีนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องมีการวิเคราะห์เพราะเป็นองค์ประกอบที่ทำให้วัสดุปอซโซลานเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานนิค ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์ ได้แก่ ปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ดังแสดงในสมการที่ (1) และ (2)

$$2\,C_3S + 11H \rightarrow C_3S_2H_8 \text{ หรือ } C\text{-}S\text{-}H + 3CH \quad (1)$$

$$2\,C_2S + 9H \rightarrow C_3S_2H_8 + 3CH \quad (2)$$

เมื่อ C_3S คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต
C_2S คือ ไดแคลเซียมซิลิเกต
H คือ น้ำ
CSH คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต
CH คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์

จากสมการที่ (1) และ (2) เป็นปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์โดยไตรแคลเซียมและไดแคลเซียมซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ที่มีสมบัติให้ค่ากำลังรับแรงอัดแก่คอนกรีตตามอายุการบ่ม นอกจากนี้ไตรแคลเซียมอะลูมิเนตสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นสารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือพอร์ตแลนไดซ์ (Portlandite) เป็นผลิตภัณฑ์รองเสมอ หากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตมีปริมาณมากจะทำให้คอนกรีตมีความคงตัวต่ำ ดังนั้นหากซิลิกาในสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเปลี่ยนเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการต่อไป ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$3CH + 2S + 5H \rightarrow C_3S_2H_8 \quad (3)$$

ในกรณีเดียวกันหากอลูมิน่าในสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะได้แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตที่เป็นผลิตภัณฑ์เช่นกัน ดังแสดงในสมการที่ (4) [28]

$$3CH + A + 3H \rightarrow C_3AH_6 \quad (4)$$

เมื่อ S คือ ซิลิกา
A คือ อลูมิน่า
CAH คือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต

และเมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยระยองกับข้อกำหนดของการจัดประเภทสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 พบว่าเถ้าลอยระยองที่นำมาใช้จัดอยู่ในประเภท C ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยระยองที่นำมาใช้กับเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

Chemical Compositions	Fly Ash	Class of Fly Ash	
		F	C
($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$), ร้อยละต่ำสุด	50.86	70.0	50.0
(SO_3) ร้อยละสูงสุด	6.11	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น ร้อยละสูงสุด	0.56	3.0	3.0
(Loss on lgnition : LOI)	7.68	6.0	6.0
(Na_2O) ร้อยละสูงสุด	0.62	1.5	1.5

อย่างไรก็ตาม ASTM C 618 ไม่ได้แนะนำว่าปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ควรมีเท่าใดจึงจะเหมาะสมหรือเพียงพอ เพียงแต่บอกว่าถ้าหาก CaO มีปริมาณที่สูงเกินไป (มักเกินร้อยละ 10) จะมีแนวโน้มว่าเถ้าถ่านหินดังกล่าวจะเป็น Class C และถ้า CaO มีปริมาณต่ำกว่าร้อยละ 10 มักพบว่าเถ้าถ่านหินดังกล่าวเป็น Class F ทั้งนี้เพราะหากเถ้าถ่านหินมีปริมาณ CaO สูงเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะช่วยในการยึดประสานได้บ้างคล้ายกับปูนซีเมนต์ แต่หากมีปริมาณ CaO สูงมากๆ มักจะไม่ค่อยดีเพราะอาจมีปัญหาด้านการขยายตัวเนื่องจากปูนขาวอิสระ (Free CaO) อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะแบ่งเถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ประเภท แต่เถ้าถ่านหินทั้ง Class F และ Class C ต่างก็มีการนำมาใช้ในงานคอนกรีตกันอย่างแพร่หลายทั้ง 2 ประเภทและไม่ได้มีข้อบ่งชี้ที่ชัดเจนว่าเถ้าถ่านหิน Class F หรือ Class C ดีกว่ากัน[29]

4.1.2 สมบัติทางกายภาพ

จากผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยระยองและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 4 จะพบว่าเถ้าลอยระยองมีค่าปริมาณความชื้น ความถ่วงจำเพาะ และความหนาแน่นน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 นอกจากนี้เถ้าลอยระยองยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยระยองมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 โดยเถ้าลอยที่มีความละเอียดมากสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วและให้กำลังแก่คอนกรีตสูงเนื่องจากทำปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ ขณะที่เถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่จะไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้หมดทั้งอนุภาค [29]

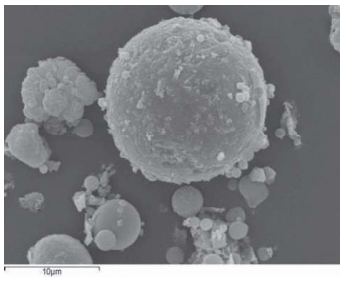
ตารางที่ 4 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยระยองและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

Physical Properties	Fly Ash	OPC
Moisture Content,%	0.56	0.74
Surface Area, cm^2/g	5866	3376
Specific Gravity	2.53	3.15
Water Requirement , % of control	109.5	100
Bulk Density , kg/m^3	690	1000

4.1.3 โครงสร้างทางจุลภาค

1. ลักษณะของอนุภาคโดยวิธีเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาค ได้แก่ ภาพถ่ายขยายของเถ้าลอยระยองและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท ที่ 1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) พบว่าอนุภาคของตัวอย่างเถ้าลอยระยองมีลักษณะรูปทรงกลมบิดเบี้ยวบ้างเล็กน้อยและมีขนาดเล็กใหญ่คละกัน ดังรูปที่ 1 ส่วนลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเหลี่ยมและมีพื้นผิวขรุขระค่อนข้างมาก ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 ภาพถ่ายกำลังขยายอนุภาคของเถ้าลอยระยอง

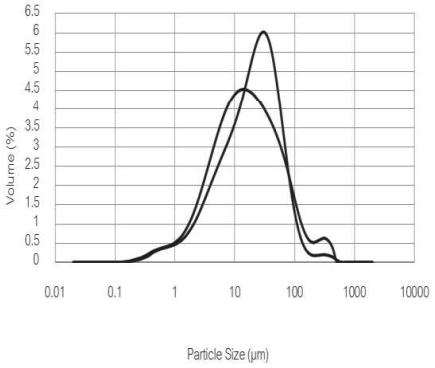
รูปที่ 2 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ลักษณะเถ้าลอยที่มีรูปร่างกลม ตัน ย่อมทำให้คอนกรีตลื่นไหลได้ดีขึ้นและใช้น้ำในส่วนผสมคอนกรีตลดลงเป็นผลให้คอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำลงและส่งผลให้กำลังของคอนกรีตสูงขึ้นในทางตรงกันข้าม หากเถ้าลอยมีรูปร่างไม่แน่นอนและกลวง ย่อมมีการดูดน้ำเข้าสู่อนุภาคและต้องการน้ำในส่วนผสมมากขึ้น [29]

2. ลักษณะการกระจายขนาดคละของอนุภาคเถ้าลอยระยองและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยวิธีเทคนิค Particle Size Distribution (PSD)

จากผลการทดสอบและวิเคราะห์การกระจายขนาดคละของอนุภาคเถ้าลอยระยองและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าเถ้าลอยระยองส่วนใหญ่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเท่ากับ 37.22 ไมโครเมตร (μm) ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนใหญ่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเท่ากับ 59.22 ไมโครเมตร (μm) ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจากการที่อนุภาคเฉลี่ยของเถ้าลอยระยองมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคเฉลี่ยของ

ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ย่อมส่งผลทำให้อนุภาคของ เถ้าลอยระยองสามารถกระจายเข้าไปอุดแทรกระหว่างช่องว่างของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ดีขึ้นโดยช่วยให้ซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่นมากขึ้นส่งผลทำให้มีคุณสมบัติในการรับแรงอัดได้ดีมากขึ้นด้วย [30]

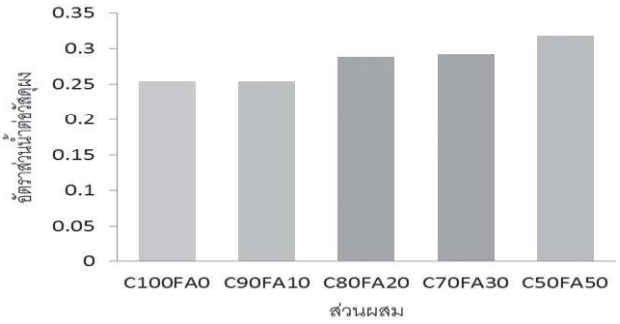


รูปที่ 3 ลักษณะการกระจายขนาดคละของอนุภาคเถ้าลอยระยองและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

4.2 สมบัติทางกายภาพของของซีเมนต์เพสต์ในสภาวะสด

4.2.1 การไหลแผ่

จากรูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบการไหลแผ่ตามมาตรฐาน ASTM C 109 กำหนด (ร้อยละ 110 ± 5) พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองจะมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยอง ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ10 คือ 0.25 และซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนการแทนที่เพิ่มขึ้นจะมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเพิ่มขึ้นด้วยเป็นลำดับ กล่าวคือซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 20, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก จะมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.28 0.29 และ 0.32 ตามลำดับ ทั้งนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยระยองแสดงที่แสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยระยองมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีค่าความต้องการน้ำมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังนั้นเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนการแทนที่เพิ่มขึ้นย่อมทำให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเพิ่มขึ้นด้วย

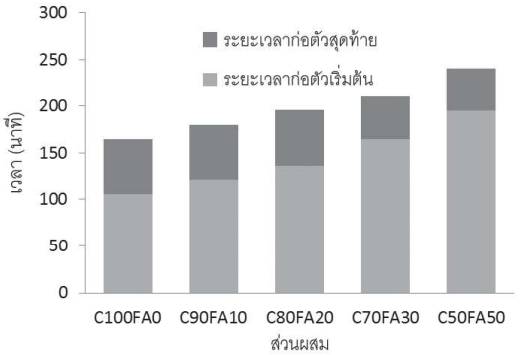


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุผงและส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์

4.2.2 ระยะเวลาก่อตัว

จากผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าเมื่อพิจารณาอิทธิพลของสัดส่วนผสมในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยอง พบว่าระยะเวลาก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของซีเมนต์เพสต์จะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองที่มากขึ้น กล่าวคือ ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ทั้งระยะต้นและระยะปลายของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วน ร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก จะมีระยะเวลาก่อตัวที่ช้ากว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท ที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยอง ทั้งนี้เนื่องจากในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นสารประกอบหลักที่ช่วยทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดการก่อตัวและแข็งตัวเร็วขึ้น ดังนั้นการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองเท่ากับเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ลง ในทำนองเดียวกัน การลดปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ลงจึง

หมายถึงปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) หรือ เอไลต์ที่ลดลงด้วย ซึ่งเป็นการหน่วงกระบวนการทำปฏิกิริยาของ (C_3S) ไปด้วย [29-33] ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ซีเมนต์เพสต์ใช้เวลาก่อตัวและแข็งตัวนานขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย เถ้าลอยระยองที่เพิ่มขึ้น

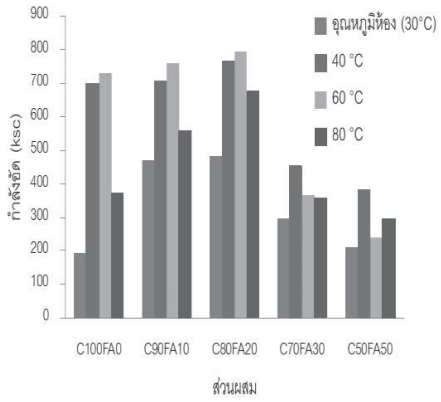


รูปที่ 5 ค่าระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

นอกจากนี้ระยะเวลาก่อตัวที่นานขึ้นมีแนวโน้มที่จะเพิ่มการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวพลาสติก (Plastic Shrinkage) ได้ง่ายขึ้น หรือมีการระเหยของน้ำออกจากผิวหน้าคอนกรีตมากเกินไปก็ทำให้เกิดรอยแตกร้าวที่ผิวหน้าคอนกรีตได้ง่ายขึ้นเช่นกัน การแตกร้าวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมอาจเกิดขึ้นได้ หากแหล่งที่มาของเถ้าถ่านหินดังกล่าวมีการนำวัสดุอื่นๆ ที่เป็นของเสีย (Waste) ไปเผาร่วมเป็นเชื้อเพลิงกับถ่านหิน ซึ่งอาจทำให้คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินจากแหล่งดังกล่าวเกิดการบวมและแตกร้าว เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีที่เปลี่ยนไปจากเดิม ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาการแตกร้าวหรือการไม่แข็งตัวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินในส่วนผสม จึงต้องมีการทดสอบเถ้าถ่านหินก่อนนำไปใช้งานว่ามีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานที่เชื่อถือได้ หรือมีการใช้เถ้าถ่านหินจากแหล่งที่เชื่อถือได้ [29,33]

4.3 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์เมื่อผ่านการบ่มที่อุณหภูมิห้องและบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้า

จากรูปที่ 6 พบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท ที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองกับซีเมนต์เพสต์มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนที่ต่างกัน คือ ร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ภายใต้การบ่มที่อุณหภูมิห้องและบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 40°C, 60°C และ 80°C พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยระยองมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงทำให้อนุภาคของเถ้าลอยระยองสามารถกระจายเข้าไปอุดแทรกระหว่างช่องว่างของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ดีในปริมาณสัดส่วนผสมดังกล่าวโดยจะไปช่วยให้ซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่นมากขึ้นส่งผลทำให้มีความสามารถในการรับแรงอัดได้ดีมากขึ้น [29-35] และเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มพบว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 60°C ซีเมนต์เพสต์ดังกล่าวจะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด ในขณะที่การบ่มที่อุณหภูมิห้องจะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการบ่มด้วยความร้อนในเตาอบไฟฟ้าจะเป็นการช่วยเร่งให้เกิดปริมาณแคลเซียมซิลิเกตที่มากกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้องโดยแคลเซียมซิลิเกตจะมีส่วนช่วยในการเชื่อมประสานของเนื้อซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นการบ่มด้วยความร้อนในเตาอบไฟฟ้าจึงทำให้ซีเมนต์เพสต์มีค่ากำลังรับแรงอัดที่มากกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง [31,34]



รูปที่ 6 ค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิห้องและบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้า

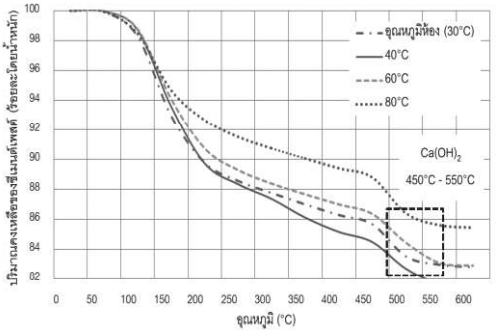
4.4 ผลการทดสอบเพื่อหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ด้วยเทคนิค TGA

จากการนำตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดไปทดสอบหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ของซีเมนต์เพสต์ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA) ทำให้ได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$)

จากรูปที่ 7 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ของซีเมนต์เพสต์ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA) เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการบ่มจะพบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิการบ่มที่ต่างกัน คือ อุณหภูมิห้อง (30°C), บ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 40°C, 60°C และ 80°C จะมีค่าปริมาณคงเหลือของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ได้จากการทดสอบค่าน้ำหนักที่สูญเสียไป ดังแสดงในตารางที่ 5 ซึ่งจากการเปรียบเทียบปริมาณคงเหลือของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการบ่มที่ต่างกัน คือ อุณหภูมิห้อง (30°C), บ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 40°C, 60°C และ 80°C จะมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 3.1400, 3.6961, 2.5298 และ 3.0372 ตามลำดับ ซึ่งจากการที่ซีเมนต์เพสต์ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนร้อยละ 20 ที่อุณหภูมิการบ่มที่ 60°C จะมีปริมาณคงเหลือของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) น้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะการบ่มด้วยความร้อนในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิดังกล่าวจะมีความชื้นน้อยมาก ซีเมนต์เพสต์จึงมีการนำน้ำในโพรงมาใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยการบ่มที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะยิ่งส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีการนำน้ำมาใช้มากขึ้นทำให้มีปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ที่มากขึ้น [30-35] ดังสมการที่ (5)

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (5)$$



รูปที่ 7 ผลการทดสอบหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ด้วยเทคนิค TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนร้อยละ 20 ที่อุณหภูมิการบ่มที่ต่างกัน

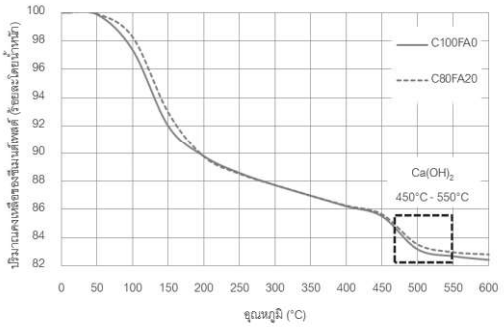
ตารางที่ 5 แสดงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ของซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนร้อยละ 20 ที่อุณหภูมิการบ่มที่ต่างกัน

อุณหภูมิที่ใช้บ่ม (°C)	ปริมาณคงเหลือของ ($Ca(OH)_2$) (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
อุณหภูมิห้อง (30°C)	3.1400
40	3.6961
60	2.5298
80	3.0372

4.4.2 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองที่มีต่อปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$)

จากรูปที่ 8 แสดงผลการหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ของซีเมนต์เพสต์ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA) เมื่อพิจารณาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยอง จะพบว่าซีเมนต์เพสต์ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนร้อยละ 20 กับซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองที่บ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60°C จะมีปริมาณคงเหลือของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) แสดงในตารางที่ 6 ซึ่งจากการเปรียบเทียบปริมาณคงเหลือของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนร้อยละ 20 จะมีปริมาณคงเหลือของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) น้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยอง ทั้งนี้เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิคดังแสดงในสมการที่ (6) โดยซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่มีในเถ้าลอยระยองจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทำให้ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ลดลง [30-35]

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO2 \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO \cdot 3H2O \qquad (6)$$



รูปที่ 8 ผลการทดสอบหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ด้วยเทคนิค TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนร้อยละ 20 กับซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยอง ที่อุณหภูมิการบ่ม 60°C

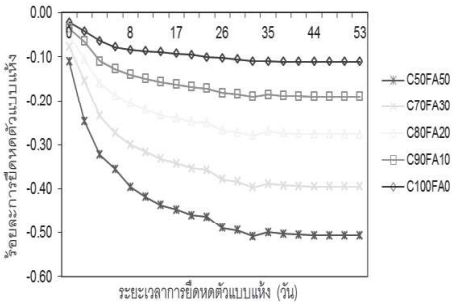
ตารางที่ 6 แสดงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนร้อยละ 20 กับซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยอง ที่อุณหภูมิการบ่ม 60°C

ส่วนผสม	ปริมาณคงเหลือของ ($Ca(OH)_2$) (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
C100FA0	2.5331
C80FA20	2.5298

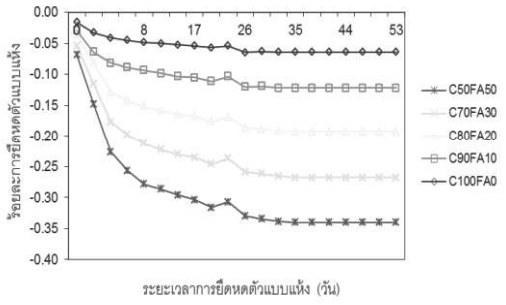
4.5 ผลการทดสอบหาค่าการหดตัวแบบแห้ง

4.5.1 พิจารณาผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อการหดตัวแบบแห้ง

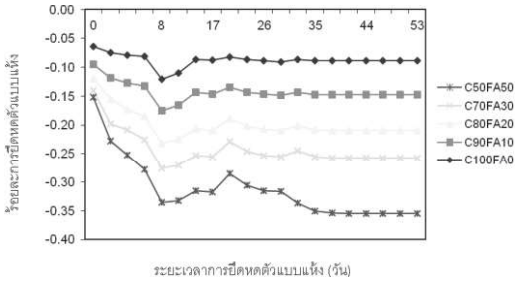
จากรูปที่ 9 - 12 เป็นผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองกับซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก จากการบ่มที่อุณหภูมิห้องและบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 40°C, 60°C และ 80°C พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าการหดตัวมากที่สุด ส่วนการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้า พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการบ่มสูงขึ้น ค่าการหดตัวจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะการบ่มในเตาอบไม่มีความชื้นจากภายนอกประกอบกับน้ำที่อยู่ภายในเนื้อซีเมนต์เพสต์จะถูกนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงทำให้มีการหดตัวที่น้อยลง [30-35]



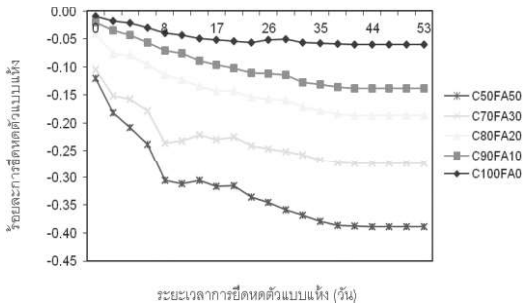
รูปที่ 9 การยืดหดตัวแบบแห้งในการบ่มที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30°C)



รูปที่ 10 การยืดหดตัวแบบแห้งในการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 40°C



รูปที่ 11 การยืดหดตัวแบบแห้งในการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60°C

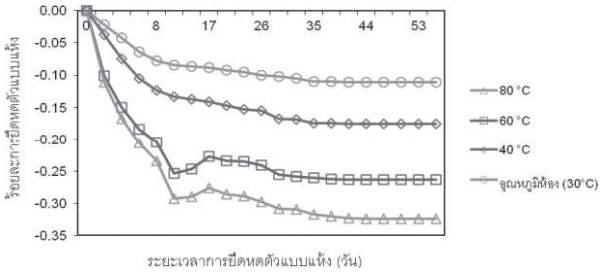


รูปที่ 12 การยืดหดตัวแบบแห้งในการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 80°C

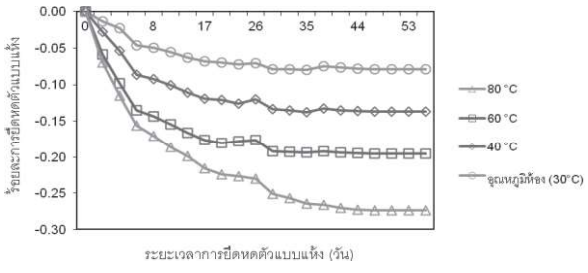
4.5.2 พิจารณาผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อการหดตัวแบบแห้ง

จากรูปที่ 13 – 17 เป็นผลการทดสอบการยืดหดตัวแบบแห้งของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองกับซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก จากการบ่มที่อุณหภูมิห้องและบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 40°C, 60°C และ 80°C พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองมีค่าการหดตัวมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองโดยในช่วงแรกพบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย เถ้าลอยระยองจะมีการหดตัวอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของเถ้าลอยระยองที่เข้าไปอุดแทรกระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีขนาดเล็ก

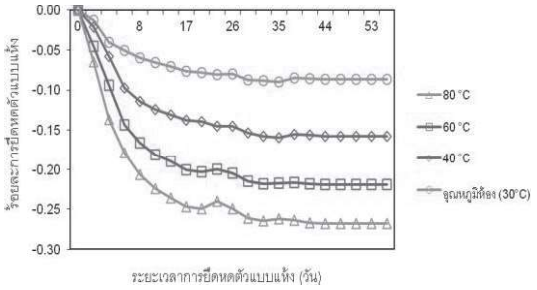
กว่าอีกทั้งมีผิวขรุขระและมีความเป็นเหลี่ยมมุมทำให้มีความต้องการในการดูดซึมน้ำมากขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยระยองที่เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่เพิ่มขึ้นและจากค่าการทดสอบที่เถ้าลอยระยองมีค่าความต้องการน้ำมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเมื่อนำไปบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ จึงเกิดการสูญเสียน้ำที่มากขึ้นตามอุณหภูมิการบ่มที่เพิ่มขึ้น จึงเป็นผลทำให้มีโพรงเกิดขึ้นในเนื้อซีเมนต์เพสต์ ที่เรียกว่า โพรงคาปิลลารี (Capillary Pores) จึงเป็นสาเหตุทำให้ซีเมนต์เพสต์มีอัตราการหดตัวที่มากขึ้นนั่นเอง ดังนั้นซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองจะมีค่าการหดตัวน้อยที่สุด รองลงมาเป็นซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 ตามลำดับ ทั้งอาจเป็นผลมาจากการที่ซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองจะมีการยึดเกาะตัวที่แน่นกว่าและมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย เถ้าลอยระยองจึงมีการระเหยตัวของน้ำได้น้อยกว่าทำให้มีอัตราการหดตัวที่น้อยตามไปด้วย [30-35]



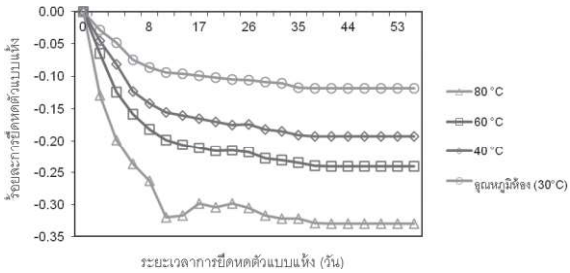
รูปที่ 13 การยืดหดตัวแบบแห้งในอัตราส่วนการแทนที่ C100FA0



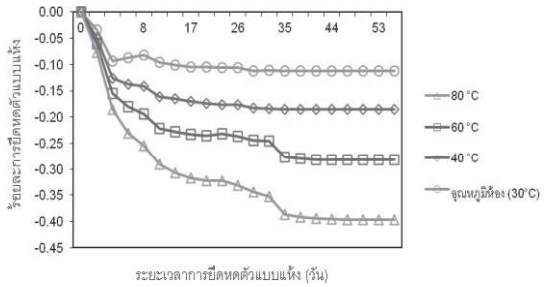
รูปที่ 14 การยืดหดตัวแบบแห้งในอัตราส่วนการแทนที่ C90FA10



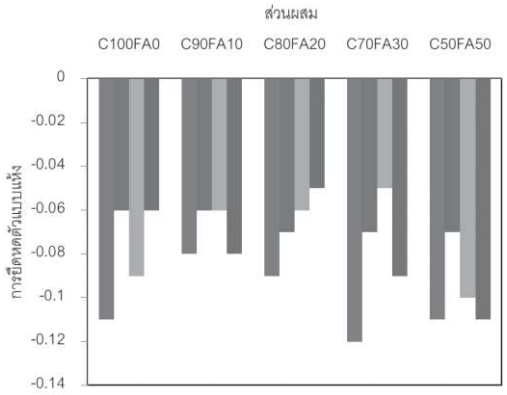
รูปที่ 15 การยืดหดตัวแบบแห้งในอัตราส่วนการแทนที่ C80FA20



รูปที่ 16 การยืดหดตัวแบบแห้งในอัตราส่วนการแทนที่ C70FA30



รูปที่ 17 การยืดหดตัวแบบแห้งในอัตราส่วนการแทนที่ C50FA50



รูปที่ 18 การยืดหดตัวของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่ม 53 วัน

5. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิจัย สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ซีเมนต์เพสต์จะมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองที่มากขึ้น

2. ซีเมนต์เพสต์จะมีระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์จะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองที่มากขึ้น

3. ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ พบว่าซีเมนต์เพสต์ พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด

4. ผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่บ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60°C จะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด ในขณะที่การบ่มที่อุณหภูมิห้องจะมีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยที่สุด

5. ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองที่มีต่อการหดตัวแบบแห้ง พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยองจะมีค่าการหดตัวมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยอง

6. ผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อการหดตัวแบบแห้ง พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิห้องมีค่าการหดตัวมากที่สุด ส่วนการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้า พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการบ่มสูงขึ้น ค่าการหดตัวจะลดลง

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ นายมนัส ไก่ฟ้า นางสาวศิรัญญา สรรพานิช และนางสาวสุภาวดี อารียาภรณ์รีย์ ผู้ช่วยทำวิจัยในห้องปฏิบัติการ และที่สำคัญยิ่ง ขอขอบพระคุณ คุณสิริธร จิตารีย์ ผู้ช่วยทำวิจัยและจัดทำข้อมูล

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Kajamane N., Nataraja M., and Lakshamanan N., “An introduction to geopolymer concrete”. Journal of Indian Concr 2011; 25 – 8.

[2] Taylor H., “Cement chemistry”. Thomas Telford. London 1997.

[3] Gartner E., “Industrially interesting approaches to low – CO_2” Cements Cem Cincr Res 2004; 34(9): 14 89-98.

[4] Huntzinger D., and Eatmon T., “A life – cycle assessment of cement manufacturing : comparing traditional process with alternative technologies. Journal of Clean Product, 2009; 17(7): 668-75.

[5] Malhotra V., “Introduction sustainable development and concrete technology” ACI concr Int 2002; 24(7): 22.

[6] Mccaffery R., “Climate change and the cement industry”, GCL. Environmental Special Issue 2002; 15 – 9.

[7] Meyer C., “The greening of the concrete industry”. Cem Concr Compos 2009; 31(8): 601-15.

[8] Gartner E. “Industrially interesting approaches to low – CO2”. Cements Cem Cincr Res 2004; 34(9): 1489-98.

[9] Cement Technology Roadmap., 2009, “carbon emission reduction up to 2050, IEA.

[10] Purnell P., “Material nature versus structural nature:the embodied carbon of fundamental structural elements”. Environ Sci Technol. 2011; 46(1): 454-61.

[11] Huntzinger, D. and Eatmon T., “A life – cycle assessment of cement manufacturing : comparing traditional process with alternative technologies. Journal of Clean Product. 2009; 17(7): 668-75.

[12] Mccaffery R., “Climate change and the cement industry”. GCL, Environmental Special Issue. 2002; 15 – 19.

[13] Mehta P., Zachar J., Claisse P., Naik T., and Ganjian E., editors. “Sustainable cements and concrete for the climate change era – a review”. Proceedings of the second international conference on sustainable construction materials and technologies, Universita Politecnica della Marche, Ancona Italy. 2010; 1- 10.

[14] Meyer C., “The greening of the concrete industry”. Cem Concr Compos. 2009; 31(8): 601-15.

[15] Shi X., Collins F., Zhao X., and Wang Q. “Mechanical properties and microstrucyure analysis of fly ash geopolymeric recycled concrete” Journal of Hazard Mater 2012; 237: 20-9.

[16] Malhotra V., and Mehta P., “High – performance, high – volume fly ash concrete materials mixture, proportioning properties construction practice and case histories 2nds”, Ottawa Supplementary cementing materials for sustainable development incorporated. 2005; 1 – 124.

[17] Davidovits J., “Chemistry of Geopolymeric Systems” Terminology in International Conference Geopolymer Saint-Quentin France. 1999; 1-124.

[18] Mehta P. “Reducing the environmental impact of concrete”. Concr Int. 2001; 61-66.

[19] Naik T. “Sustainability of concrete construction”. Pract Periodical Struct Des Constr.

[20] Sang-Sook P., Hwa-Young K., “Characterization of fly ash-paste synthesized at different activator conditions”. Korean J Chem Eng. 2008; 25(1): 78-83.

[21] Homsriprasert W. “Durability of Fly Ash-based Geopolymer Mortar with Electric Oven Curing under Sodium Sulfate and Magnesium Sulfate Attacks”, A Thesis for the Degree of Master in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University. 2013; 1-2.

[22] Homsriprasert W. “Mechanical Properties and Durability of Fly Ash-based Geopolymer Concrete with Electric Oven Curing under Sodium Sulfate and Magnesium Sulfate Attacks”. A Thesis for the Doctoral of Philosophy Program in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University: 2015; 1-32.

[23] American Society for Testing and Materials. ASTM C1437 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction. Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

[24] American Society for Testing and Materials. 2008, ASTM C191 Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. *Annual Book of ASTM Standard,* Section4 Construction, Vol. 04.01 Cement, Lime and Gypsum.

[25] American Society for Testing and Materials, 2012, ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), *Annual Book of ASTM Standard,* Section 4 Construction, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate.

[26] American Society for Testing Materials, 2009, ASTM C490 Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete, *Annual Book of ASTM Standard,* Section 4 Construction, Vol 04.02 Concrete and Aggregate.

[27] American Society for Testing and Materials, 2009, ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, *Annual Book of ASTM Standard,* Section 4 Construction, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate.

[28] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา "ศักยภาพของเถ้าในการเป็นสารปอซโซลาน" วารสารคอนกรีต สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย หน้า 1-2.

[29] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, อเนก ศิริพานิชกร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, สุรพล พฤกษานุกูล บริษัท ทอรัสพอซโซลาน จำกัด "ปัญหา, อุปสรรค์ และวิธีการแก้ไขของการนำเถ้าถ่านหินไปใช้ในงานคอนกรีต" วารสารคอนกรีต สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย หน้า 1-11.

[30] Minnick LJ. Investigation Relation to the use of Fly Ash as a Pozzolanic Material as Admixture in Portland Cement Concrete. 1954.

[31] Chatveera B. and Homsriprasert W., "Behavior of Cement Paste Blended Pozzolanic Material in the Application of Microwave Energy", *KMUTT Research and Development Journal* 2011; 34(34): 299-315 (In Thai).

[32] Lane O.R. and Best J.F., Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete, Concrete International: Design & Construction 1982; 4(7): 81-92.

[33] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี "คอนกรีตกำลังสูง: วัสดุที่ใช้และปัจจัยที่ควรพิจารณา" วารสารคอนกรีต สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย หน้า 1-8.

[34] Chatveera B. and Homsriprasert W., Effect of "Microwave Energy on Compressive Strength and Durability of Cement Paste Containing Rice Husk Ash and Fly Ash" *KMUTT Research and Development Journal 34(3): 279-298.* (In Thai).

[35] ศตวรรษ หฤหรรษพงศ์ และทวิช พูลเงิน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี "อิทธิพลของปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานต่อกำลังอัดโครงสร้างจุลภาค และปริมาณการแทนที่ของซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ผสมนาโนซิลิกา" วารสารคอนกรีต สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย หน้า 1-14.