

ผลกระทบของหินฝุ่นแอนดีไซต์และหินฝุ่นชนวนบด

มีต่อสมบัติของซีเมนต์เพสต์

Effect of Ground Andesite and Slate Fines

on Properties of Cement Paste

จรินทร์ ทิมดี¹ และ ดนุพล ตันนโยภาส^{1*}

Jarin Timdee¹ and Danupon Tonnayopas^{1*}

บทคัดย่อ

ศึกษาเชิงทดลองถึงผลกระทบของหินฝุ่นแอนดีไซต์และหินฝุ่นชนวนบดที่มีต่อพฤติกรรมและสมบัติของเพสต์ โดยเตรียมตัวอย่างส่วนผสมทั้งหมดหกดาร์บ มีหินฝุ่นแอนดีไซต์และหินฝุ่นชนวนผสมในปริมาณต่างกันจำนวนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ประเภท 1 หินฝุ่นแอนดีไซต์และหินฝุ่นชนวนบดได้ตรวจความหนาแน่นจริงและวิเคราะห์ความวาวแสงของรังสีเอกซ์ตัวอย่างเพสต์มีทั้งไม่บ่มและบ่มแบบความชื้นที่ 7 และ 28 วัน แล้วจึงทดสอบความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ กำลั้งอัด และความคงทนต่อแมกนีเซียมซัลเฟต ผลทดลองพบว่า การดูดซึมน้ำและการหดตัวเพิ่มขึ้น กำลั้งอัดบ่ม 28 วัน ของเพสต์ผสมหินฝุ่นแอนดีไซต์และหินฝุ่นชนวนบดร้อยละ 10 ให้ค่าสูงสุด 39.33 และ 45.61 เมกะพาสคัล ตามลำดับ เพสต์ผสมหินฝุ่นแอนดีไซต์และหินฝุ่นชนวนบดในสภาพแวดล้อมแมกนีเซียมซัลเฟตกัดกร่อนน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ ภูมิภาคแร่และโครงสร้างจุลภาคของเพสต์ได้วิเคราะห์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่านอกจากแร่เอ็ดทรินไกต์ก็ยังมีแคลเซียมซิลิเกตออกไซด์ และแคลเซียมอะลูมิเนตออกไซด์คาร์บอนไฮเดรตดูเสมือนเป็นกลไกยึดประสาน โดเดนต์ควบคุมให้ผลด้านกำลั้ง

คำสำคัญ: เพสต์, หินฝุ่นแอนดีไซต์, หินฝุ่นชนวน, โครงสร้างจุลภาค, แร่ผสมเพิ่ม

ABSTRACT

The experiment was performed to investigate the effects of ground andesite fine (GAF) and ground slate fine (GSF) on the behavior and properties of paste. In six ingredients of specimens were

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

¹ Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): danupon.1@psu.ac.th

prepared at three different percentages of GAF and GSF contents (10, 20 and 30wt.%), by using as partial ordinary Portland cement, type I. The GAF and GSF had been examined on true density and analysed via X-ray Fluorescence. Bulk density, water absorption, compression strength and magnesium sulfate durability tests were carried out, after uncuring and curing specimens were treated under water curing condition for 7 and 28 days. These results revealed increase in water absorption and volumetric drying shrinkage. After 28 days of curing, compressive strength of the paste blended GAF and GSF provided highest of 39.33 MPa and 45.61 MPa, respectively. Respective of the magnesium sulphate environment, the deterioration of GAF and GSF pastes were lower than that of cement paste. The mineral phases and microstructure of pastes were analyzed using X-ray Diffraction and Scanning Electron Microscopy. It is demonstrated that the texture and ettringite, also calcium silicate oxide and calcium aluminate oxide carbonate hydrate seem to be the contributory mechanism controlling the strength benefit.

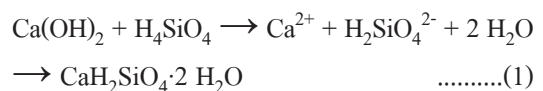
Key words: paste, andesite fine, slate fine, microstructure, mineral admixture

บทนำ

การค้นคว้าวัสดุประสานที่ต้นทุนต่ำและมีประสิทธิภาพต่อนิเวศสำหรับนำมาใช้เป็นสารเพิ่มและเป็นทรัพยากรธรรมชาติ ได้กลายเป็นประเด็นสำคัญใน อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจกปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาประมาณร้อยละ 7-8 (Hamidi *et al.*, 2013) การลดการปล่อยต้องขยายแนวพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่ประหยัดพลังงาน ให้เป็นทางเลือกไปจากปูนซีเมนต์แบบเดิม (คณพล และ กัลยาณี, 2554; ชัยณรงค์ และ คณพล, 2556) ในทศวรรษที่ผ่านมานักวิจัยได้เสนอทางเลือกส่วนใหญ่คือการใช้เป็นสารเติมปอซโซลานที่ปรับปรุงสมบัติเชิงกลและความคงทนของวัสดุประสาน โดยเฉพาะวัสดุของเสียจากทรัพยากรใช้แล้วหมดไปให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก ซึ่งการนำของเสียจากในกลุ่มประเทศเศรษฐกิจร่วมอาเซียนภูมิภาคนี้กลับมาใช้เป็นวัสดุยึดประสานในคอนกรีต ถือว่าเป็นการ

บริหารจัดการก่อสร้างอย่างยั่งยืนแก่สิ่งแวดล้อมภูมิภาคนี้ด้วย

แร่ผสมเพิ่มซึ่งเป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญในคอนกรีตเทคโนโลยี มีอิทธิพลต่อการยึดประสานของวัสดุปูนซีเมนต์ เมื่อบดจนเป็นผงละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนขาวที่อุณหภูมิปกติและรวมความชื้นแล้วจึงเกิดปฏิกิริยาแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับกรดซิลิกาตั้งสมการ 1 ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งมีสมบัติในการยึดประสาน



วัสดุปอซโซลานมีองค์ประกอบทางเคมีหลักคือซิลิกาหรือซิลิกาและอะลูมินา ก็จัดเป็นหนึ่งในแร่ผสมเพิ่มที่ได้นำมาใช้ประโยชน์มาจาก 2 แหล่งใหญ่ ได้แก่ ปอซโซลานจากธรรมชาติ (natural pozzolan) และปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต (artificial pozzolan) ปอซโซลานที่มาจากธรรมชาตินั้น ได้แก่ ไคอะทอไมด์

(diatomaceous earth) หินเชิร์ต แก้วภูเขาไฟ เปลือกหอย หินภูเขาไฟ หินดินดาน ดินขาว วัสดุเหล่านี้เมื่อนำไปใช้งานจะต้องผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การเผา การบด และการอบให้แห้ง เป็นต้น ส่วนปอซโซลานผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต ได้แก่ แก้วลอย ตะกรันเตาถลุง ซิลิกาฟูม แก้วจากผลิตผลการเกษตร เป็นต้น เทบพร้อมใช้ได้ทันที

งานวิจัยที่ผ่านมาใช้หินฝุ่นจากอุตสาหกรรมเหมืองหินมาปรับปรุงหรือทดแทนปูนซีเมนต์ในรูปแบบแร่ผสมเพิ่ม (mineral admixture) มีอยู่พอสมควร เช่น ผสมกับฝุ่นหินคาร์บอนเนต (Tonnyapas and Phoodburi, 2008) หินฝุ่นแกรนิต (คนุพล และ กัลยาณี, 2554) หินชนวนแทนซีเมนต์มอร์ตาร์ถึงร้อยละ 75 (Barluenga and Hernandez-Olivares, 2010) หินชนวนแทนที่ร้อยละ 30 ในคอนกรีตมวลเบา (คนุพล และ ปฏิพัทธ์, 2557) ตะกอนบำบัดน้ำจากกระบวนการใส่หินแอนดีไซต์ทำเป็นแร่ผสมเพิ่มในส่วนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 0.5 ทำเป็นคอนกรีต พบว่าการดูดซับของรูเล็กเพิ่มขึ้น ใช้ทำเป็นโครงสร้างไม่รับแรงได้ (Sogancioglu *et al.*, 2013) Hamidi *et al.* (2013) ผลิตปูนซีเมนต์ประสิทธิภาพเชิงนิเวศด้วยหินแอนดีไซต์ธรรมชาติและปรับปรุงร้อยละ 0-40 พบว่าแอนดีไซต์ให้ปฏิกิริยาปอซโซลานปานกลาง ช่วยประหยัดพลังงาน นอกจากนี้เศษหินแอนดีไซต์ยังทำเป็นตัวเติมในคอนกรีต ยางมะตอยร้อยละ 6 ทำให้เสถียรกว่าส่วนผสมชนิดอื่น แต่น้อยกว่าส่วนผสมหินปูนล้วน (Uzun and Terzi, 2012) และเติมในกระเบื้องเซรามิกมวลเบา (เสาวภา และคณะ, 2556) ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงศึกษาพฤติกรรมของหินฝุ่นแอนดีไซต์ที่มีประมาณ 135 ตัน/ชั่วโมง และหินฝุ่นชนวนที่เป็น

วัสดุเหลือทิ้งอยู่ภายในเหมือง นำมาทำเป็นแร่ผสมเพิ่ม (mineral admixture) ในเพสต์และเปรียบเทียบสมบัติของเพสต์ผสมหินฝุ่นทั้งสองเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์ธรรมชาติ ตาม ASTM C10/C10M-14 (ASTM, 2014) ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 (OPC) หินฝุ่นแอนดีไซต์จากโรงโม่หินในจังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นหินอัคนีเนื้อจืด (aphanitic igneous rock) สีเทาแกมเขียว มีความถ่วงจำเพาะ 2.50 และหินฝุ่นชนวนจากหินแปรมีรีวชนวน (คนุพล, 2553) สีดำ ความถ่วงจำเพาะ 2.70 ทั้งสองมาคัดและบดขนาดละเอียดกว่า 45 ไมครอน หินฝุ่นแอนดีไซต์บด (GAF) ประกอบด้วยแร่แคลไซต์ ควอตซ์ ไคลโนคลอร์และอะนอร์ไทต์ ส่วนหินฝุ่นชนวนบด (GSF) ประกอบด้วยแร่ควอตซ์ อิลไลต์ แคลไซต์ ไคลโนคลอร์และโดโลไมต์ (อาชิยะและคณะ, 2556) องค์ประกอบทางเคมีแสดงในตารางที่ 1 พบว่าหินฝุ่นแอนดีไซต์บดมี CaO สูงกว่าปกติ (Hamidi *et al.*, 2013) เนื่องจากในแหล่งหินมีหินปูนอยู่ด้วยและบางแห่งปรากฏสายแร่แคลไซต์แทรกเข้าไปในหิน ดังนั้นจึงเกิดการปนเปื้อนในช่วงการโม่หินจึงทำให้หินฝุ่นแอนดีไซต์มี CaO สูง ดังนั้นองค์ประกอบทางเคมีของหินฝุ่นไม่อยู่ในเกณฑ์สารปอซโซลาน ในขณะที่หินฝุ่นชนวนบดจัดอยู่ในเกณฑ์ ตาม ASTM C618-12a (ASTM, 2012c) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ก็มีค่าอยู่ในช่วงกำหนด ASTM C150/C150M-12 (ASTM, 2012a)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานในการศึกษาครั้งนี้ด้วยวิธีการวางแสงรังสีเอกซ์

องค์ประกอบทางเคมี	OPC (wt.%)	GAF (wt.%)	GSA (wt.%)
SiO ₂	21.30	22.63-22.78	49.88
Al ₂ O ₃	4.96	6.10-7.59	16.46
Fe ₂ O ₃	3.10	15.34-18.31	10.36
CaO	66.61	28.79-28.44	7.84
MgO	-	3.62-5.01	1.24
P ₂ O ₅	-	0.18-0.29	-
SO ₃	2.72	0.32-0.75	0.38
K ₂ O	0.50	0.97-1.40	2.98
TiO ₂	-	1.71-2.48	0.92
MnO	-	0.26-0.28	0.16
Na ₂ O	-	0.73	0.95
LOI	0.74	17.43	8.83

2. การออกแบบส่วนผสมและเตรียมตัวอย่าง

เติมหินปูนแอนติไซต์หรือหินปูนชนวนบดและคัดขนาดละเอียดกว่า 45 ไมครอน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ที่อัตราสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก (ตารางที่ 2) ส่วนผสมเหล่านี้มาผสมให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันด้วยกระบอกผสมบนเครื่องบดลูกกลิ้ง (jar mill) เป็นเวลา 30 นาที การเตรียมก่อนตัวอย่างเพสต์ทดสอบใช้เบ้าหล่อขนาด 50×50×50 มม. กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคือ 0.40 คงที่ตลอดการทดสอบ เพื่อต้องการศึกษาถึงอิทธิพลของน้ำที่มีต่อการอัดแข็งตัวของตัวอย่างเพสต์ (self-

consolidation paste) และให้เนื้อตันที่สุด หล่อและบ่มแบบความชื้น (แช่ในน้ำ) เป็นเวลา 7 และ 28 วัน และไม่บ่ม เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 26 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60-80)

3. วิธีการทดสอบ

ทดสอบคุณภาพปูนซีเมนต์ที่ผสมหินปูนบดทั้งสองในกรอบ เวลาการก่อตัวด้วยไวแคตตาม ASTM C 191-13 (ASTM, 2013c) อุณหภูมิไฮเดรชันแทนการวัดความร้อนด้วยเทอร์โมมิเตอร์ ความหนาแน่นจริงด้วยวิธี Pycnometer ก่อนการ

ตารางที่ 2 ส่วนผสมตัวอย่างเพสต์ที่ศึกษา

รายการวัสดุ	ส่วนผสม			
	0%	10%	20%	30%
OPC	720	648	576	504
น้ำประปา	288	288	288	288
GAF or GSA	0	72	144	216

นำวัสดุประสานไปหล่อก้อนเพสต์ที่อัตราส่วนต่างๆ ได้กำหนดไว้ ทดสอบความคงทนต่อสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อิ่มตัว ($M \text{ gSO}_4$) เติมสารลงไปประมาณร้อยละ 35 โดยน้ำหนักน้ำหรือค่าพีเอช 10 เพื่อจะเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นกว่าที่ ASTM C88-13 (ASTM, 2013a) กำหนดไว้ โดยวัดการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างเพสต์ทั้งสามมิติ (ปริมาตร)และน้ำหนัก ทั้งก่อนและหลังแช่ในแต่ละสัปดาห์ เมื่อครบกำหนดบ่มแบบความชื้น (แช่ในน้ำ) ระยะเวลา 7 และ 28 วัน ตาม ASTM C192/C192M-12a (ASTM, 2012b) และไม่บ่ม จึงนำตัวอย่างไปทดสอบ ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ การหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตร และกำลังอัด ตาม ASTM C109/C109M-13 (ASTM, 2013b) ตรวจแร่ประกอบที่เกิดขึ้นในเพสต์บ่ม 28 วัน ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) และโครงสร้างจุลภาคจากถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยคัดเอาตัวอย่างกำลังอัดสูงสุดมาวิเคราะห์ การวิเคราะห์เคมีของเม็ดปูน จำนวนร้อยละของมวลของเสียและวัตถุจับปูนซีเมนต์เดิมที่ตรวจสอบในวัตถุผสมเป็นผลมาจากกฎการอนุรักษ์มวลและทฤษฎีที่ไม่ทราบสื่ค่าสามารถหาได้จากสมการกำหนดไว้ระดับ 1 (Taylor, 1997) ดังสมการที่ (2) ถึง (5) และค่าเหมาะสมต่อไปนี้

โมดูลัสไฮเดรชัน (hydration modulus)

$$HM = [CaO/(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3)] \dots\dots\dots(2)$$

ค่า HM อยู่ในช่วง = 2.1– 2.4

โมดูลัสซิลิกา (silica modulus)

$$SM = [SiO_2/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)] \dots\dots\dots(3)$$

ค่า SM อยู่ในช่วง = 2.0 – 3.0

โมดูลัสเหล็ก (iron modulus)

$$IM = (Al_2O_3 / Fe_2O_3) \dots\dots\dots(4)$$

ค่า IM อยู่ในช่วง = 1.0 – 2.5

ตัวประกอบการอิ่มตัวของปูนขาว (lime saturation factor)

$$LSF = [CaO/(2.8SiO_2 + 1.2Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3)] \dots\dots\dots(5)$$

ค่า LSF อยู่ในช่วง = 0.92 – 0.98

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

1. โมดูลัสปูนซีเมนต์

ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบทางเคมีสำหรับปูนซีเมนต์ ได้แก่ โมดูลัสไฮเดรชัน (HM) โมดูลัสซิลิกา (SM) โมดูลัสเหล็ก (IM) และตัวประกอบความอิ่มตัวของปูนขาว (LSF) พบว่าค่า HM, LSF ของหินฝุ่นแอนดริชต์บดมีค่ามากกว่าหินฝุ่นชนวนบด ส่วนค่าของ SM, IM ของหินฝุ่นชนวนบดมีค่ามากกว่าหินฝุ่นแอนดริชต์บด ตามเกณฑ์ ASTM C150 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่า HM = 2.27 และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Yen *et al.* (2011) พบว่าค่าโมดูลัสปูนซีเมนต์มีค่าน้อยกว่า มีเพียงค่า IM ของหินฝุ่นชนวนบดที่มีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับดังในตารางที่ 3 ซึ่งต่างจากผลงานการผลิตปูนซีเมนต์นิเวศผสมตะกอนของ Lin and Lin (2005) เพียงเล็กน้อย ซึ่งหากหินฝุ่นทั้งสองได้รับการเผาเอน่าจะเพิ่มประสิทธิภาพการเป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติสูงขึ้น เช่นหินอัคนีชนิดกรดและปานกลางของ Montanheiro *et al.* (2004) และมอร์ตาร์ดหินฝุ่นแกรนิตแปร (พวงแก้ว และคณะ, 2557)

2. ความหนาแน่นจริงของวัสดุที่ใช้

ความหนาแน่นจริงของวัสดุปูนซีเมนต์

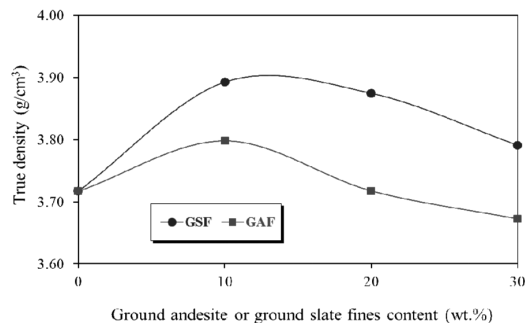
ตารางที่ 3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบทางเคมีของหินปูนแอนดิไซต์บดและหินปูนชนวนบด

ชนิดวัสดุประสาน	HM	SM	IM	LSF
OPC	2.27	2.64	1.60	0.98
GAF	0.48-0.63	0.93-0.99	0.33-0.49	0.34-0.35
GSF	0.10	1.86	1.59	0.05

(OPC) หินปูนแอนดิไซต์บด (GAF) และหินปูนชนวนบด (GSF) แทนที่ร้อยละ 0 10 20 และ 30 พบว่าเมื่อเติม GAF ทำให้วัสดุประสานมีค่าความหนาแน่นจริงเพิ่มขึ้นจาก OPC ประมาณร้อยละ 1.99-4.72 ส่วน GSF ทำให้ผงวัสดุประสานมีค่าความหนาแน่นจริงลดลงจาก OPC ประมาณร้อยละ 0.02-2.18 (ภาพที่ 1) ซึ่งทั้ง GAF และ GSF ร้อยละ 10 มีค่าความหนาแน่นจริงมากที่สุด

3. ความถ่วงจำเพาะ

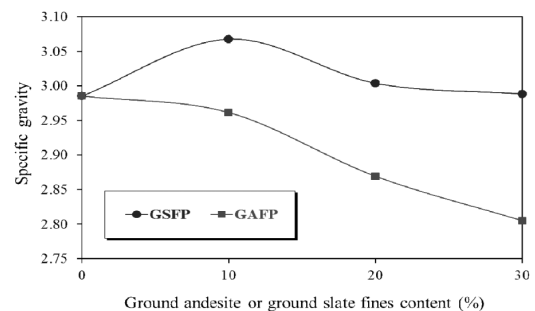
ความถ่วงจำเพาะของเพสต์ปูนซีเมนต์ผสมหินปูนแอนดิไซต์บด (GAFP) และเพสต์ปูนซีเมนต์ผสมหินปูนชนวนบด (GSFP) สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นจริง ดังในภาพที่ 2



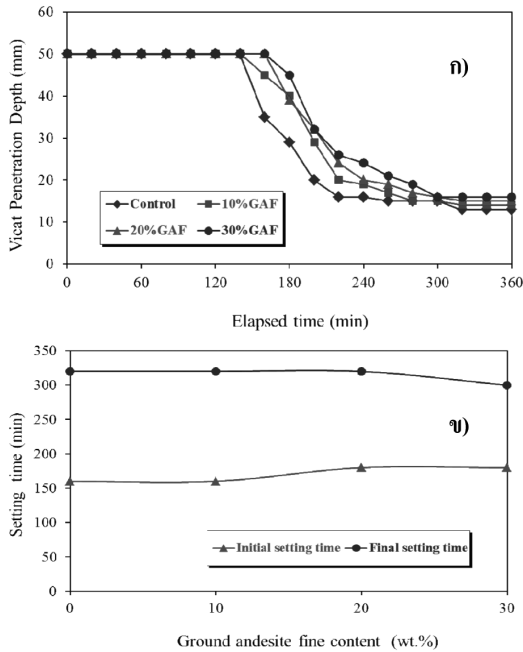
ภาพที่ 1 ความหนาแน่นจริงของผงวัสดุประสานเท่ากับ 3.893 และ 3.798 กรัม/ซม.³ ตามลำดับ และที่ปริมาณร้อยละ 30 มีค่าความหนาแน่นจริงน้อยที่สุดคือ 3.791 และ 3.673 กรัม/ซม.³ ตามลำดับ สอดคล้องกับค่าความถ่วงจำเพาะของหินปูนบดทั้งสองชนิด

4. เวลาก่อตัว

เพสต์ผสมหินปูนบดทั้งสองชนิดไม่มีการแยกส่วนและการเอี่ยม เวลาก่อตัวช้าที่สุดคือ ซีเมนต์เพสต์มีระยะเวลาเริ่มก่อตัวที่ 160 นาที ระยะเวลาที่สิ้นสุดก่อตัว 320 นาที และ เพสต์ผสมหินปูนแอนดิไซต์ พบว่าเพสต์ผสมหินปูนแอนดิไซต์บดปริมาณร้อยละ 10 เริ่มก่อตัวที่เวลา 160 นาที สิ้นสุดการก่อตัวที่เวลา 320 นาที (ภาพที่ 3 ก) ก่อตัวเร็วที่สุด ในกรณีนี้ผสมหินปูนชนวนบด เพสต์ก่อตัวเร็วที่สุดคือ ผสมหินปูนชนวนบดร้อยละ 10 เริ่มก่อตัวที่เวลา 140 นาที ก่อตัวเสร็จที่เวลา 300 นาที (ภาพที่ 4 ก) เมื่อพิจารณาช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดการก่อตัว พบว่าการผสมหินปูนแอนดิไซต์บด (ภาพที่ 3 ข) ช่วยทำให้ช่วงเวลาการก่อตัวเร็วขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่เพสต์ผสมหินปูนชนวนบดช่วยทำให้ช่วงเวลาการก่อตัวช้าลงเล็กน้อย (ภาพที่ 4 ข) นั่นคือการปริมาณหินปูนบดเพิ่มขึ้นทำระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเพิ่มขึ้นตาม และการเพิ่มปริมาณหินปูนส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการถ่ายน้ำของ



ภาพที่ 2 ความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างเพสต์

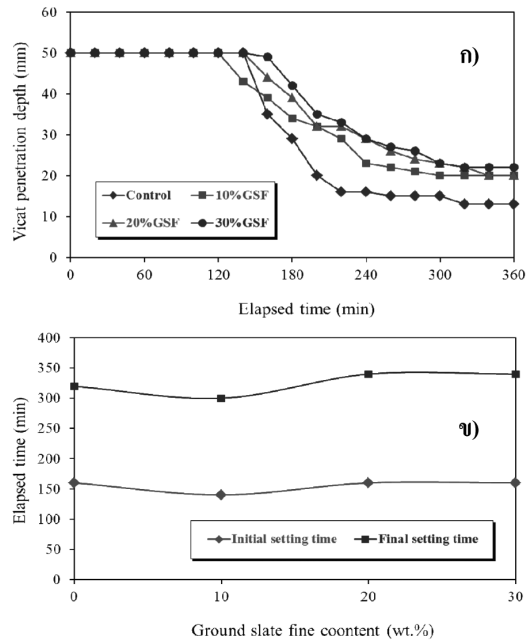


ภาพที่ 3 เพสต์หินฝุ่นแอนดีไซต์ระดับ ก) พฤติกรรมการก่อตัว และ ข) ระยะเวลาก่อตัว

ความชื้นเหลวปกติจากโพรงและได้แพร่ไปสู่ซีเมนต์เพสต์ สอดคล้องผลการศึกษาของ Barluenga and Hernandez-Olivarea (2010)

5. อุณหภูมิการก่อตัว

อุณหภูมิไฮเดรชันของเพสต์ระยะเริ่มต้นก่อตัวจนถึงสิ้นสุดก่อตัวนั้น พบว่าอุณหภูมิมีการปรับเปลี่ยนค่อยๆ เพิ่มขึ้นพักเป็นช่วงๆ การก่อตัวเพสต์ผสมแอนดีไซต์จากเวลาผ่านไปเริ่มประมาณ 160-180 นาที อุณหภูมิสูงขึ้นและปกติลดลงเล็กน้อย เป็นช่วงเวลามีการปรับปฏิกิริยาและดูดความร้อนเข้าไปในระบบเพื่อกระตุ้นเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้น หลังจากนั้นอุณหภูมิไฮเดรชันได้สูงขึ้นเรื่อย จนกระทั่งสิ้นสุดการก่อตัว (ภาพที่ 5 ก) อุณหภูมิก่อตัวของเพสต์ควบคุมสูงกว่าทั้งหมด แต่สำหรับอุณหภูมิไฮเดรชันของเพสต์ผสมหินฝุ่นชนวนนั้น ขณะเริ่มก่อตัวเวลาผ่านไป 140-160

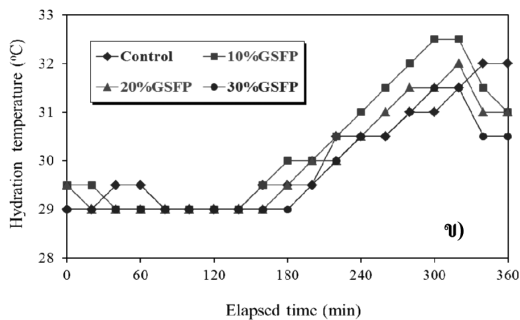
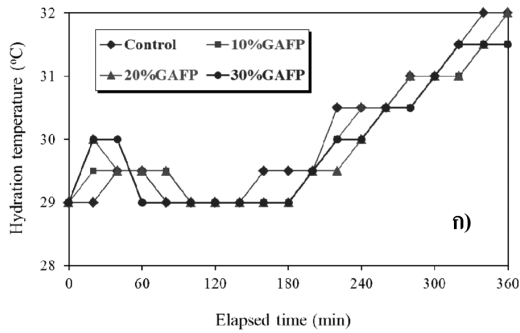


ภาพที่ 4 เพสต์หินฝุ่นชนวนระดับ ก) พฤติกรรมการก่อตัว และ ข) ระยะเวลาก่อตัว

นาที อุณหภูมิคงเดิมภายหลังจากนั้นอุณหภูมิสูงขึ้นไปเรื่อยๆจนพักเป็นช่วงเช่นกัน อันเป็นกระบวนการคายความร้อนออกมา จนเมื่อเพสต์ใกล้เข้าสู่ระยะการสิ้นสุดการก่อตัวพบว่าการดูดความร้อนปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เริ่มอีกครั้งที่ราว 320 นาที เป็นต้นไป (ภาพที่ 5 ข)

6. ความหนาแน่นรวม

ความหนาแน่นรวมของตัวอย่างเพสต์ ในกรณีที่ผสมหินฝุ่นแอนดีไซต์ พบว่าค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณของหินฝุ่นแอนดีไซต์เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความหนาแน่นรวมของเพสต์สูงสุดคือ ที่เติม GAF ร้อยละ 10 ประมาณ 1,941 กก./ม.³ (ภาพที่ 6 ก) ในกรณีที่ผสมหินฝุ่นชนวนพบค่าความหนาแน่นรวมมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณของ GSF เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยที่ค่าความหนาแน่นรวมของ

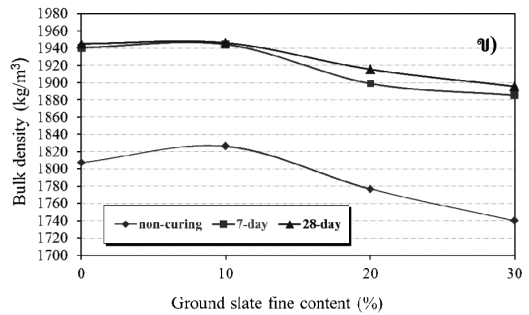
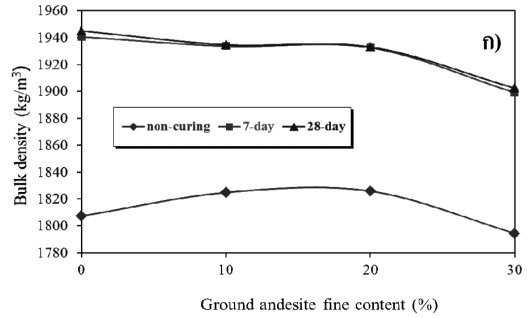


ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไฮเดรชันของเพสต์ผสมหินฝุ่น ก) แอนดิไซต์บด และ ข) ชนวนบด

GSFP สูงสุดคือ ที่เติม GSF ปริมาณร้อยละ 10 ประมาณ 1,960 กก./ลบ.ม. และเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นรวมระหว่างไม่บ่ม บ่ม 7 และ 28 วัน พบว่าค่าความหนาแน่นรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีอายุบ่มเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 6 ข)

7. การดูดซึมน้ำ

การดูดซึมน้ำของตัวอย่างเพสต์ที่บ่ม 7 และ 28 วัน พบว่าเพสต์ที่อายุบ่มเพิ่มขึ้นมีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มตามขึ้นด้วย ในกรณีที่ผสมหินฝุ่นแอนดิไซต์บด เมื่อผสมในปริมาณร้อยละ 10 พบว่าค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.40-2.74 แต่เมื่อเพิ่มส่วนผสม พบว่าค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มที่ลดลงร้อยละ 0.93-1.33 โดยที่ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 7.98 คือเพสต์ที่

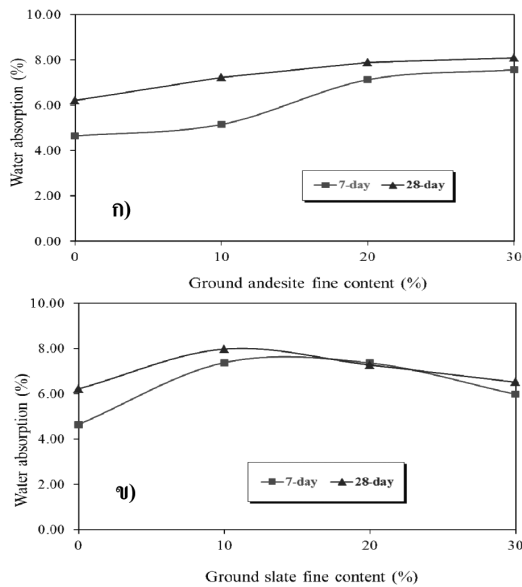


ภาพที่ 6 ความหนาแน่นรวมของเพสต์ผสมหินฝุ่น ก) แอนดิไซต์บด และ ข) หินชนวนบด

ผสมหินฝุ่นแอนดิไซต์บดร้อยละ 10 บ่ม 28 วัน และค่าการดูดซึมน้ำมีค่าต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 5.98 บ่ม 7 วัน (ภาพที่ 7 ก) ของเพสต์ผสมหินฝุ่นแอนดิไซต์ร้อยละ 30 ในกรณีที่ผสมหินฝุ่นชนวนบด ในปริมาณร้อยละ 10 พบว่าค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.51-0.93 และเมื่อปริมาณผสมเพิ่มขึ้น ค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 2.40-2.49 โดยที่ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 8.08 ของเพสต์ที่ผสมหินฝุ่นชนวนบดร้อยละ 30 อายุบ่ม 28 วัน และค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 5.16 ของเพสต์ผสมหินฝุ่นชนวนบดร้อยละ 10 อายุบ่ม 7 วัน (ภาพที่ 7 ข)

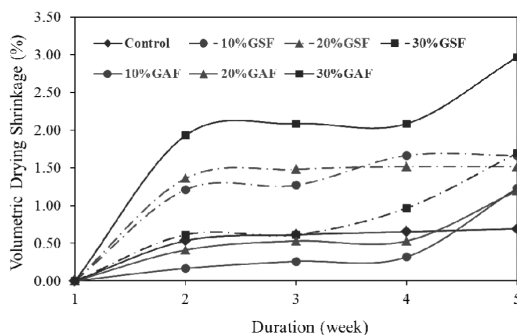
8. การหัดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตร

จากการวัดการหัดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตรของเพสต์ พบว่าสูตรที่มีการหัดตัวน้อยที่สุดคือเพสต์ที่ผสมหินฝุ่นแอนดิไซต์บดปริมาณร้อยละ



ภาพที่ 7 การดูดซึมน้ำของเพสต์ผสมหินฝุ่น ก) แอนดีไซต์บด และ ข) หินชนวนบด

10 ขณะที่การหดตัวสูงคือ เพสต์ผสมหินฝุ่นแอนดีไซต์บดร้อยละ 30 (ภาพที่ 8) เนื่องจากว่ามีรูพรุนเกิดขึ้นภายในเนื้อของเพสต์มาก เนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นในส่วนผสมของหินฝุ่นแอนดีไซต์บดที่ไซมีแรแคลไซต์ปนเปื้อนจากสายแร่แคลไซต์ที่แทรกคดเข้าไปในหน้าเหมืองหินทำอยู่ปัจจุบัน ทำให้หินที่นำมาบดผสมกัน

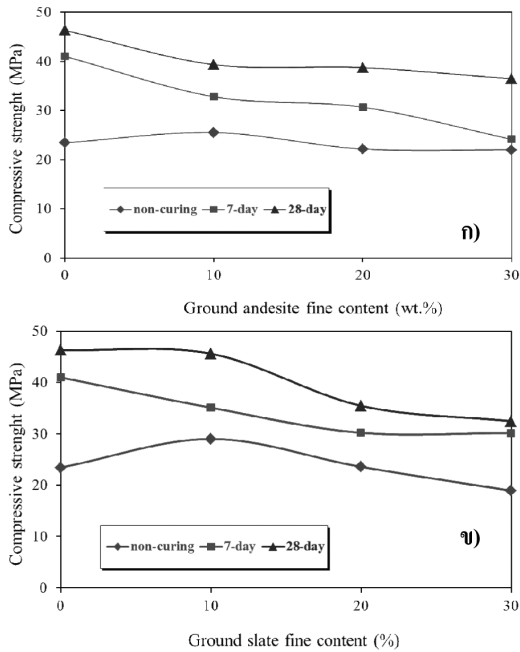


ภาพที่ 8 การหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตรของเพสต์ผสมหินฝุ่นแอนดีไซต์บดและหินฝุ่นชนวนบด

และให้หินฝุ่นส่วนประกอบ CaO (28.79%) ก่อนข้างสูงกว่าปกติ (ตารางที่ 1) ผลการหดตัวแบบแห้งเกิดขึ้นสอดคล้องกับค่าการดูดซึมน้ำ (ภาพที่ 7) เนื่องจากปฏิกิริยาหินฝุ่นบดทั้งสองทำให้เกิดรูเล็กมากขึ้น

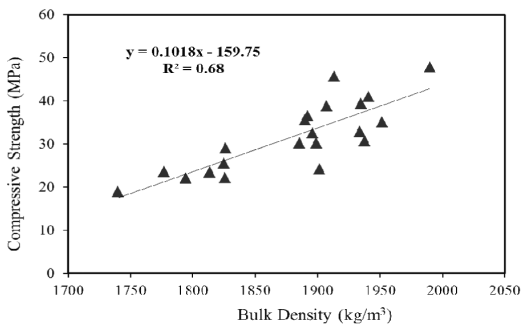
9. กำลังอัด

กำลังอัดของเพสต์ผสมหินฝุ่นแอนดีไซต์ตามอายุบ่มเพิ่มขึ้นผสมในปริมาณร้อยละ 10 พบว่าค่ากำลังอัดมีค่าลดลงร้อยละ 8.22-8.44 แต่เมื่อผสมในปริมาณที่เพิ่มขึ้น พบว่าค่ากำลังอัดมีแนวโน้มที่ลดลงร้อยละ 1.28-16.88 โดยค่ากำลังอัดสูงสุดประมาณ 39 เมกะพาสคัล ของเพสต์ที่ผสมหินฝุ่นแอนดีไซต์ร้อยละ 10 อายุบ่ม 28 วัน และค่ากำลังอัดมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 21.97 เมกะพาสคัล คือที่ผสมในปริมาณร้อยละ 30 ไม่บ่ม (ภาพที่ 9 ก) ในกรณีผสมหินฝุ่นชนวน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผสมขึ้น จนถึงปริมาณร้อยละ 10 พบว่าค่ากำลังอัดมีค่าลดลงร้อยละ 2.16-5.92 แต่เมื่อผสมมากกว่าร้อยละ 10 พบว่าค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงร้อยละ 4.53-15.31 โดยค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 45.61 เมกะพาสคัล ที่ผสมในปริมาณร้อยละ 10 อายุบ่ม 28 วัน และค่ากำลังอัดมีค่าต่ำสุด 18.90 เมกะพาสคัล ของสูตรที่ผสมในปริมาณร้อยละ 30 ไม่บ่ม (ภาพที่ 9 ข) เมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบของ *Ezziane et al.* (2007) พบว่าค่ากำลังอัดของเพสต์ที่ศึกษาครั้งนี้มีค่าใกล้เคียงกัน ในเพสต์ที่ผสมหินฝุ่นแอนดีไซต์บด และมีค่าสูงกว่าในเพสต์ที่มีหินฝุ่นชนวนบด ซึ่งกำลังอัดของเพสต์ผสมหินฝุ่นบดทั้งสองชนิดที่ร้อยละ 10 บ่ม 28 วัน ได้กำลังสูง (>40 เมกะพาสคัล) มากกว่าผลทดสอบของ *Hamidi et al.* (2013) ที่ให้กำลังปานกลาง



ภาพที่ 9 กำลังอัดของเพสต์ผสมผงหินฝุ่น ก) แอนดิไซต์บด และ ข) ชนวนบด

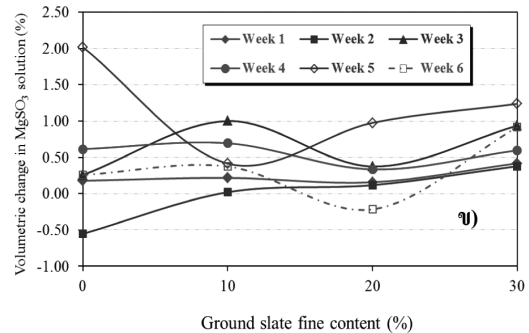
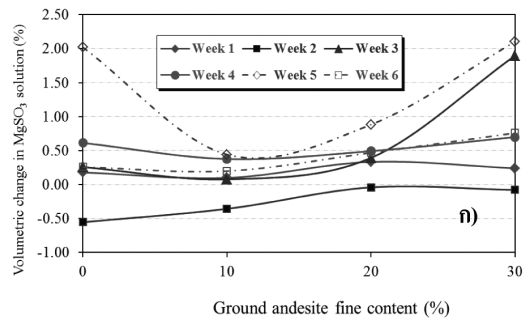
นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังอัดที่มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นรวม (ภาพที่ 10) เช่นเดียวกับงาน Eden *et al.* (1980) ในขณะที่ความสัมพันธ์การดูดซึมน้ำของเพสต์ผสมหินฝุ่นบดทั้งสองก็ให้ผลสนับสนุนความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดในทำนองเดียวกับค่าความพรุนของคอนกรีตพรุนในงานของ Watson (1980)



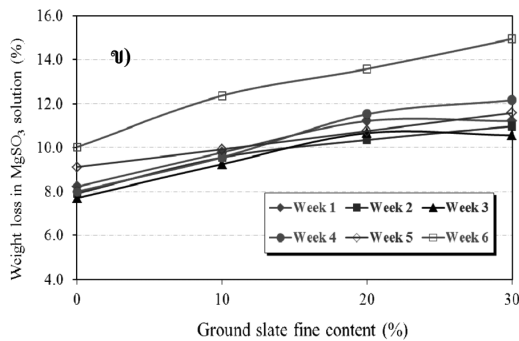
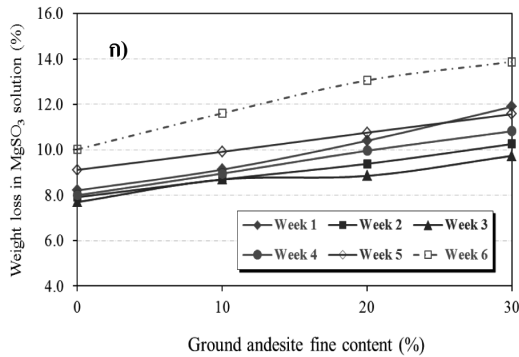
ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความหนาแน่นรวมของเพสต์

10. ความคงทนต่อสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

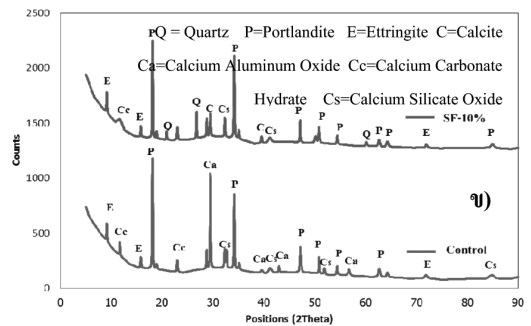
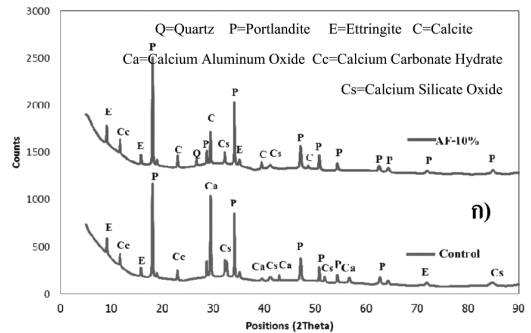
ความคงทนของตัวอย่างเพสต์ผสมหินฝุ่นแอนดิไซต์บด (ภาพที่ 11 ก) และผสมหินฝุ่นชนวนบด (ภาพที่ 11 ข) เซึ่งปริมาตรค่อนข้างแปรปรวน อย่างไรก็ตามพออนุมานว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรค่อนข้างใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ ในขณะที่ความคงทนพิจารณาจากการสูญเสียน้ำหนักค่อนข้างชัดเจนกว่า ความคงทนลดลงตามอัตราส่วนหินฝุ่นแอนดิไซต์บดที่เพิ่มขึ้นราวร้อยละ 4 (ภาพที่ 12 ก) และลดลงตามหินฝุ่นชนวนบดเพิ่มขึ้นร้อยละ 5 (ภาพที่ 12 ข)



ภาพที่ 11 หลังแช่แมกนีเซียมซัลเฟตเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของเพสต์ผสมผงหินฝุ่น ก) แอนดิไซต์บด และ ข) ชนวนบด



ภาพที่ 12 หลังแช่แมกนีเซียมซัลเฟตน้ำหนักสูญหายของเพสต์ผสมหินฝุ่น ก) แอนดิไซต์บด และ ข) ชนวนบด



ภาพที่ 13 ลายพิมพ์ซ้อนกันของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีเมนต์เพสต์ควบคุมกับเพสต์ผสมที่บ่ม 28 วัน ก) หินฝุ่นแอนดิไซต์บด และ ข) หินฝุ่นชนวนบด

11. วิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์แร่ด้วยวิธี XRD (ภาพที่ 13) ของตัวอย่างแต่ละสูตรที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดรวม 3 ตัวอย่างคือ ผสมหินฝุ่นแอนดิไซต์บดร้อยละ 10 ผสมหินฝุ่นชนวนบดร้อยละ 10 และซีเมนต์เพสต์ ทุกตัวอย่างบ่ม 28 วัน ลายพิมพ์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD pattern)เปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์กับเพสต์ผสมหินฝุ่นแอนดิไซต์บด (ภาพที่ 13 ก) ผลการคำนวณปริมาณแร่แต่ละชนิดด้วยวิธีการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟ พบเอตทริงไทท์ (ettringite-E) พอร์ตแลนด์หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) และแคลเซียมซิลิเกตออกไซด์ (calcium silicate oxide- CSO) ปริมาณมากที่สุด ส่วนปริมาณวัฏภาคแร่ชนิดอื่นได้แสดงในตารางที่ 4

ในขณะที่งานวิจัยของ Lin and Lin (2005) ใช้เก้าตะกรันเหล็กผสมหล่อเพสต์พบว่าเกิด Ca(OH)₂ และ CSH มากและขนาดผลึกใหญ่ขึ้นตามอายุบ่ม

12. โครงสร้างจุลภาค

เมื่อวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค (SEM) ของเพสต์ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังอัดสูงสุด ประกอบด้วยตัวอย่างเพสต์ไม่ผสมหินฝุ่น (ตัวอย่างควบคุม) ตัวอย่างเพสต์ผสมหินฝุ่นแอนดิไซต์บดปริมาณร้อยละ 10 และตัวอย่างเพสต์ผสมหินฝุ่นชนวนบด ปริมาณร้อยละ 10 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายแตกต่างกัน เห็นได้ว่าโครงสร้างภายในมีการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันในระหว่างรอย

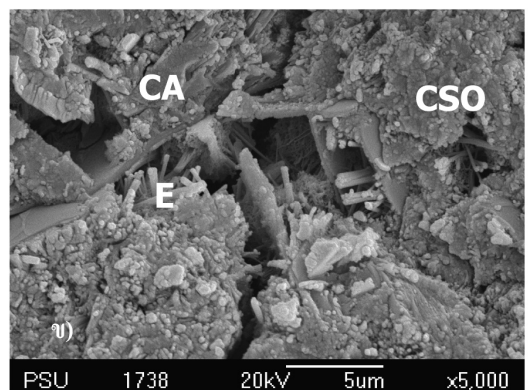
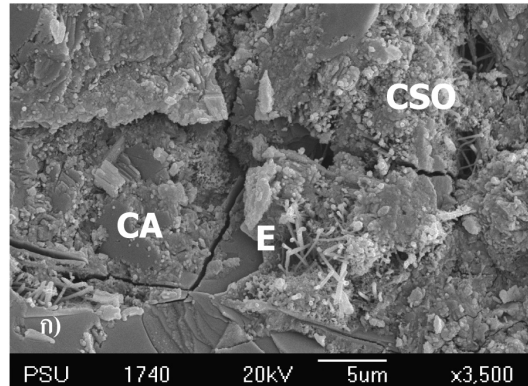
ตารางที่ 4 ปริมาณและชนิดแร่ที่เกิดในตัวอย่างเพสต์ที่ทดลอง อายุบ่ม 28 วัน

ชนิดวัสดุภาคแร่	ปริมาณ (%)		
	OPC	GAF	GSF
พอร์ตแลนด์ไคต์ (portlandite)	16.60	25.36	23.43
แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate)	12.72	9.51	8.08
เอ็ดทรินไคต์	31.04	27.78	26.19
แคลเซียมซิลิเกตออกไซด์	21.06	16.73	16.32
แคลเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์คาร์บอเนตไฮเดรต (calcium aluminum oxide carbonate hydrate)	18.59	16.52	17.11
ควอตซ์ (quartz)	-	6.10	8.64

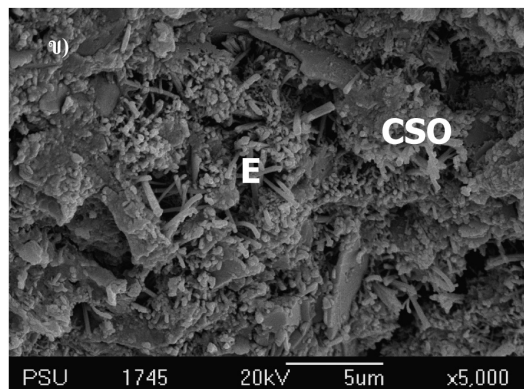
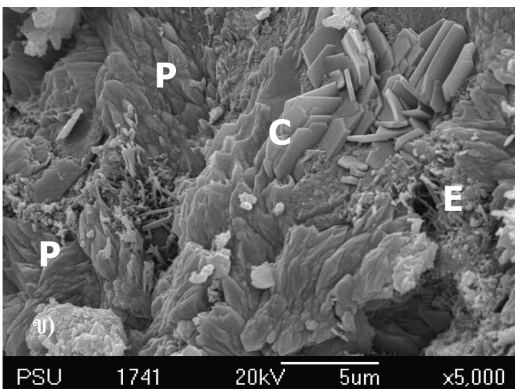
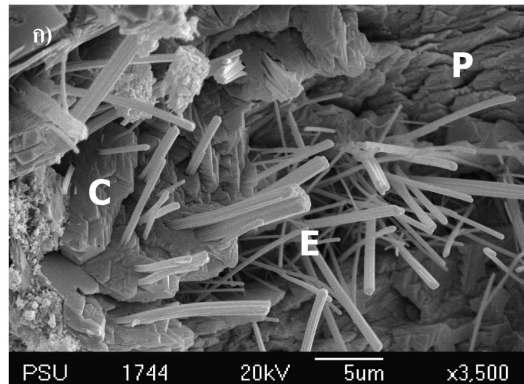
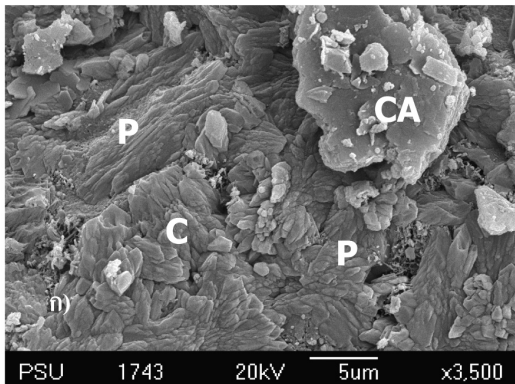
ต่อ (interfacial transition zone-ITZ) ภายในเนื้อตัวอย่างเพสต์มีรูโพรงเล็กน้อย ในซอกโพรงมีผลึกรูปคล้ายแท่งเข็มยาวของแร่เอ็ดทรินไคต์ (E) (ภาพที่ 14 ก) เนื้อส่วนมากประกอบด้วยแคลเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์คาร์บอเนตไฮเดรต (CA) แคลเซียมคาร์บอเนต (C) (รูปที่ 14 ข) หลักฐานจากภาพถ่ายครั้งนี้จึงเป็นการยืนยันว่าการที่กำลังอัดพัฒนาได้น้อย เป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานขึ้นอย่างจำกัดในเนื้อของเพสต์ควบคุม ในขณะที่เนื้อของเพสต์ผสมฝุ่นแอนติไซต์บดปรากฏมีปริมาตรโพรงรูเล็ก (capillary pore) กระจายทั่ว และมีพอร์ตแลนด์ไคต์ (P) แคลเซียมคาร์บอเนต เอ็ดทรินไคต์ (ภาพที่ 15) ส่วนเนื้อเพสต์ผสมผงหินชนวน ปรากฏแร่เอ็ดทรินไคต์ พอร์ตแลนด์ไคต์ แคลเซียมซิลิเกตออกไซด์ (CSO) และรูโพรงกระจายทั่วเช่นกัน (ภาพที่ 16)

สรุปผล

ผลการศึกษามบัตินของเพสต์ผสมหินฝุ่นแอนติไซต์บดและหินฝุ่นชนวนบด ในอัตราส่วนต่างๆ ทั้งสภาวะสดและบ่ม เพื่อประเมินศักยภาพ



ภาพที่ 14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเพสต์ควบคุมบ่ม 28 วัน กำลังขยาย ก) 3,500 เท่า และ ข) 5,000 เท่า



ภาพที่ 15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเพสต์ผสมหินฝุ่นแอนดิไซต์บดร้อยละ 10 บ่ม 28 วัน กำลังขยาย ก) 3,500 เท่า และ ข) 5,000 เท่า

ภาพที่ 16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเพสต์ผสมหินฝุ่นชนวนบดร้อยละ 10 บ่ม 28 วัน กำลังขยาย ก) 3,500 เท่า และ ข) 5,000 เท่า

ถึงการเป็นแร่ผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์หลายชนิดด้วยกัน ประกอบด้วย การก่อตัว โมครูลัส ส่วนประกอบ เนื้อวัสดุประสาน ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ กำลังอัด สามารถวิจารณ์ผลและสรุปผลการศึกษาทดลองได้ดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์โมครูลัสปูนซีเมนต์จากส่วนผสมขององค์ประกอบทางเคมีหินฝุ่นแอนดิไซต์และหินฝุ่นชนวนบดทำให้ได้โมครูลัสไฮดรชันอยู่ในเกณฑ์ส่วนผสมปูนซีเมนต์ธรรมดา ตาม ASTM C10/C10M-14 (ASTM, 2014)

2. การเพิ่มปริมาณหินฝุ่นทั้งสองมีผลต่อการก่อตัวของเพสต์ หากผสมหินฝุ่นแอนดิไซต์บดมีแนวโน้มระยะเวลาเร็วขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณหินฝุ่นแอนดิไซต์ที่ผสม ตรงกันข้ามกับเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมหินฝุ่นชนวนบดนั้นนานขึ้นเล็กน้อย

3. อุณหภูมิไฮดรชันเกิดขึ้นของเพสต์ผสมแอนดิไซต์สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดการก่อตัว ทั้งนี้เป็นผลจากมี CaO สูงในแอนดิไซต์นั่นเอง จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮดรชันเพิ่มขึ้นจากเนื้อแอนดิไซต์เองด้วย ขณะที่อุณหภูมิไฮดรชันของเพสต์ผสมหินฝุ่นชนวนบดลดลงก่อนช่วง

สิ้นสุดการแข็งตัว

4. ตัวอย่างเพสต์มีค่าความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ กำลังอัดลดลงและการหดตัวแบบแห้งเพิ่มขึ้นตามปริมาณแทนที่หินฝุ่นแอนดิไซต์ บดหรือหินฝุ่นขนาดที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวก็ยิ่งขึ้นกับชนิดของหิน ฝุ่นและอายุบ่มด้วย เช่นเดียวกับงานวิจัย

5. ในสภาพแวดล้อมแมกนีเซียมซัลเฟต รุนแรงมาก เพสต์ผสมหินฝุ่นทั้งสองมีสภาพความ กทนลดลงตามปริมาณหินฝุ่นบดเพิ่มขึ้น

6. เพสต์ผสมด้วยหินฝุ่นทั้งสองชนิดที่ ร้อยละ 10 นอกจากมีค่ากำลังอัดสูงสุด (45.61 เมกะพาสคัล) สมบัติการก่อตัว ทางกายภาพและ ความคงทนมีศักยภาพที่จะพัฒนาเป็นปูนซีเมนต์ ธรรมชาติเช่นเดียวกับการเติมฝุ่นหินปูนในปูนซี เมนต์ปอร์ตแลนด์ (Tomayopas and Phoodburi, 2008) ตะกอนจากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Chen *et al.*, 2011) ถ้ำจากตะกอนน้ำเสีย (Cyr *et al.*, 2007) หรือการกระตุ้นให้เป็นวัสดุพอซโซลาน มากขึ้นด้วยการเผาอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับหินแอนดิไซต์ในงาน Hamidi *et al.* (2013) หรือตะกอนโรงกรองน้ำประปา (Frias *et al.*, 2014) หรือหินฝุ่นแกรนิต (พวงแก้ว และคณะ, 2557) น่าจะช่วยให้หินฝุ่นที่เป็นผลพลอยได้จาก อุตสาหกรรมเหมืองหินมาใช้ประโยชน์ได้อย่าง สูงสุด ซึ่งเป็นการช่วยลดปริมาณวัสดุของเสียที่มี ผลต่อสิ่งแวดล้อมนำไปใช้ประโยชน์ใน อุตสาหกรรมก่อสร้างได้อีกทางหนึ่ง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะ วิศวกรรมศาสตร์และมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประเภทโครงการนักศึกษา ประจำปี 2555 ตามสัญญาเลขที่ ENG-55-2-7-08-0167-5

เอกสารอ้างอิง

- ชัยณรงค์ จันทรมณี และ ดนุพล ตันนโยภาส. 2556. อิทธิพลของซีไอโอดีธรรมชาติที่มีต่อ การหดตัวแบบแห้งและกำลังอัดของ มอร์ต้าร์มวลรวมหินทรายบด. *วารสาร มหาวิทยาลัยทักษิณ* 16(2): 28-36.
- ดนุพล ตันนโยภาส. 2553. *แร่และหิน*. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ดนุพล ตันนโยภาส และ กัลยาณี คุปตานนท์. 2554. คอนกรีตมวลเบาที่ทำจากมวลรวม กะลาปาล์มน้ำมันผสมหินฝุ่นแกรนิต. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ* 12(3): 138-148.
- ดนุพล ตันนโยภาส และ ปฏิพัทธ์ เพ็ญทอง. 2557. สมบัติของคอนกรีตใสมวลรวมหินพิมพ์มิชท์ เคลือบหุ้มด้วยน้ำยางธรรมชาติและผง หินชนวน. *วารสารวิจัย มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก* 7(1): 73-80.
- พวงแก้ว บัวทอง, รวิกันต์ อมฤตเบญจฤทัย และ ดนุพล ตันนโยภาส. 2557. สมบัติของ มอร์ต้าร์ผสมหินฝุ่นแกรนิตดัดแปร. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ* 17(1): 5-12.
- เสาวภา ชูศรี, ดนุพล ตันนโยภาส และ สุชาติ จันทรณีย์. 2556. การผลิตกระเบื้องเซรามิก และกระเบื้องมวลเบาจากหินฝุ่นแอนดิไซต์ ผสมเถ้าไม้ยางพารา. *วิศวกรรมสารเกษม บัณฑิต* 3(1): 70-83.
- อาชีวะ หมักหมั่น, ดนุพล ตันนโยภาส และ สุชาติ จันทรณีย์. 2556. กลไกการเผาผนึกของ กระเบื้องเซรามิกซีไอโอดีเต็มเศษหินชนวน. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ* 16(1): 10-16.
- ASTM. 2012a. ASTM C150/C150M-12. Standard specification for Portland cement. Annual Book of ASTM Standards.

- American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM. 2012b. ASTM C 192/C 192M-12. Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM. 2012c. ASTM C618-12a: Standard Specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM. 2013a. ASTM C88-13. Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM. 2013b. ASTM C109/C109M-13. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in or [50-mm] cube specimens). Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM. 2013c. ASTM C191-13. Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM. 2014. ASTM C10/C10M-14. Standard specification for natural cement. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- Barluenga, G. and Hernandez-Olivares, F. 2010. Self-levelling cement mortar containing grounded slate from quarrying waste. **Construction and Building Materials** 24 (9): 1601-1607.
- Chen, Y.-L., Ko, M.-S., Lai, Y.-C. and Chang, J.-E. 2011. Hydration and leaching characteristics of cement pastes made from electro plating sludge. **Waste Management** 31(6): 1357-1363.
- Cyr, M., Coutand, M. and Clastres P. 2007. Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials. **Cement and Concrete Research** 37(10): 1278-1289.
- Eden, N.B., Manthorpe, A.R., Miell, S.A., Szymanek, P.H and Watson, K.L. 1980. Autoclaved aerated concrete from slate waste Part 1: Some property/density relationships. **International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete** 2(2): 95-100.
- Ezziane, K., Bougara, A., Kadri, A., Khelafi, H. and Kadri, E. 2007. Compressive strength of mortar containing natural pozzolan under various curing temperature. **Cement & Concrete Composites** 29(8): 587-593.
- Frias, M., Vigil de la Villa, R., de Soto, I.,

- Garcia, R. and Baloa, T.A. 2014. Influence of activated drinking-water treatment waste on binary cement-based composite behavior: Characterization and properties. **Composites: Part B** 60: 14–20.
- Hamidi, M., Kacimi, L., Cyr, M. and Clastres, P. 2013. Evolution and improvement of pozzolanic activity of andesite for its use in eco-efficient cement. **Construction and Building Materials** 47: 1268-1277.
- Lin, K.-L. and Lin, C.-Y. 2005. Hydration characteristics of waste sludge ash utilized as raw cement material. **Cement and Concrete Research** 35(10): 1999-2007.
- Montanheiro, T.-J., Yamamoto, J.K. and Kihara, Y. 2004. Serra Geral Formation-Sao Paulo State, Brazil: a potential source for natural pozzolan. **Materials Letters** 58(6): 876-881.
- Sogancioglu, M., Yel, E. and Yilmaz-Keskin, U. S. 2013. Utilization of andesite processing waste water treatment sludge as admixture in concrete mix. **Construction and Building Materials** 46: 150-155.
- Taylor, H.F.W. 1997. **Cement Chemistry**, 2nd ed. Thomas Telford, London.
- Tonnayopas, D. and Phoodburi, T. 2008. Effects of areca nut solution on mortar blended quarry carbonate dust and oil palm fiber fuel ash, pp. 151-155. *In* 2nd **International Workshop and Conference on Earth Resources Technology Development**. April 3-4, 2008, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.
- Uzun, I. and Terzi, S. 2012. Evaluation of andesite waste as mineral filler in asphaltic concrete mixture. **Construction and Building Materials** 31: 284-288.
- Watson, K.L. 1980. Autoclaved aerated concrete from slate waste Part 2: Some property/porosity relationships. **International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete** 2(3): 121-123.
- Yen, C.-L., Tseng, D.-H. and Lin, T.-T. 2011. Characterization of eco-cement paste produced from waste sludges. **Chemosphere** 84: 220-226.