

การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์
ในงานคอนกรีตมวลเบา

นายศักดิ์สิทธิ์ พันทวี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2551

**A COMPARATIVE STUDY OF DIATOMITE AND
PERLITE IN LIGHTWEIGHT CONCRETE**

Saksith Pantawee

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2008

การศึกษาเปรียบเทียบการใช้โดอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ในงานคอนกรีตมวลเบา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.สุชนันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ศ. ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ)

กรรมการ

(ผศ. ดร.มงคล จิรวรรณ)

กรรมการ

(อ. ดร.ทนงศักดิ์ พิศาลสิน)

กรรมการ

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วราภรณ์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี : การศึกษาเปรียบเทียบการใช้โคอะคอมไมท์และเพอร์ไลท์ในงาน

คอนกรีตมวลเบา (A COMPARATIVE STUDY OF DIATOMITE AND PERLITE

IN LIGHTWEIGHT CONCRETE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ สินศิริ, 146 หน้า

การผลิตคอนกรีตในปัจจุบันได้มีความเจริญก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว โดยมีทั้งการพัฒนาในด้านการออกแบบ และวิธีการก่อสร้าง นอกจากนี้ยังมีการวิจัยและการพัฒนาวัสดุผสมคอนกรีตเพื่อปรับปรุงในด้านของคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้นและสามารถใช้งานได้ทุกสภาพการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นคอนกรีตในสภาพเหลวและคอนกรีตในสภาพที่แข็งตัวแล้ว โดยทั่วไปคอนกรีตมีน้ำหนักแห้งประมาณ 2,300 ถึง 2,400 kg/m³ ซึ่งถือว่ามากพอสมควรที่ทำให้โครงสร้างต้องสูญเสียกำลังส่วนหนึ่งไปกับการรองรับน้ำหนักของโครงสร้างเอง โดยเฉพาะในงานโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น อาคารสูง น้ำหนักของตัวอาคารที่ทับถมลงมาจากชั้นบนสุดจนถึงฐานรากจะมีขนาดใหญ่มาก ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาในด้านการออกแบบและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย จากเหตุผลดังกล่าวจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาในเรื่องของวัสดุผสมในงานคอนกรีตเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีน้ำหนักน้อยลง โดยวัสดุที่นำมาใช้มีกันอย่างแพร่หลาย ส่วนใหญ่จะเป็นมวลรวมที่มีน้ำหนักเบาหรืออาจเป็นสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มที่มีน้ำหนักเบาที่อยู่ในกลุ่มสารปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย ตะกรันจากเตาถลุง และ ซิลิกาฟูม เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือก โคอะคอมไมท์ และเพอร์ไลท์ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มสารปอซโซลานธรรมชาติ ซึ่งเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตหรือสารอะลูมิโนฟอสเฟต จึงน่าจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และสามารถทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบาลงได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำปอซโซลานธรรมชาติมาประยุกต์ใช้กับงานคอนกรีตมากมาย เช่น ทำคอนกรีตมวลเบา ใช้เป็นสารผสมเพิ่มเพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลในคอนกรีต ลดปัญหาการเกิดคราบน้ำมัน ลดการแยกตัว และลดการซึมผ่าน เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้จะนำโคอะคอมไมท์ และเพอร์ไลต์มาใช้แทนที่ทรายแทนที่ปูนซีเมนต์ และผสมเพิ่มตามอัตราส่วน เนื่องจากคุณสมบัติของโคอะคอมไมท์และเพอร์ไลท์ คือ มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ และมีความพรุนสูง เมื่อนำไปเป็นส่วนผสมในคอนกรีตทำให้น้ำหนักของคอนกรีตลดลง ดังนั้นถ้าสามารถลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตให้น้อยลงโดยที่สามารถรับแรงอัดได้ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้ จึงน่าจะสามารถลดค่าใช้จ่ายลงไปได้มากทั้งทางด้านค่าใช้จ่ายด้านฐานรากและตัวอาคารเอง

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

SAKSITH PANTAWEE : A COMPARATIVE STUDY OF DIATOMITE
AND PERLITE IN LIGHTWEIGHT CONCRETE. THESIS ADVISOR :
ASST. PROF. THEERAWAT SINSIRI, Ph.D. 146 PP.

LIGHTWEIGHT CONCRETE / NATURAL POZZOLAN / DIATOMITE / PERLITE

Nowadays the manufacturing process of concrete is growing up rapidly in development of both design and building procedure. Besides, there has been interest in research and development of material admixture for improving properties of concrete and their workability for arrays of usage, not only fresh but also hardening concrete. Generally, concrete has unit weight about 2,300 to 2,400 kg/m³ that is large and causing concrete to lose the strength for supporting their own weight of the building. Specially, the large constructions such as high buildings, the summary weight from top to foundation is very high that results in problems for design and waste of construction cost of the building. Therefore, it is important to study the materials admixture in concrete to get the lower density concrete. Various materials have been used and mostly are lightweight aggregates or low density mineral admixture Pozzolan such as fly ash, blast furnace slag and silica fume.

In this research, the mineral admixtures chosen were diatomite and perlite that are natural pozzolan and compose of aluminosilicate or aluminophosphate. These materials have a pozzolanic reactionary, so they can reduce the density of concrete. From the literature review, there are many applications that used natural pozzolan in concrete such as making lightweight concrete, alkali reduction admixture and reducing problems of bleeding, segregation and permeability. In this study, the

diatomite and perlite were used for partially replacement of sand and cement and admixed. Since diatomite and perlite have lightweight, low density and high porosity, they could possibly be used to reduce the weight of concrete. Thus if the lightweight concrete have a strength that are applicable for several conditions, it can ensure the economical benefits of constructions.

School of Civil Engineering

Academic Year 2008

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Co-Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาใช้เวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ดูแลเอาใจใส่ในการศึกษาของผู้วิจัยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด และได้สละเวลาดูแลให้คำปรึกษาวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

ศ. ดร.ปริญญ์ จินดาประเสริฐ สำหรับการสละเวลาอันมีค่าของท่านในการเป็นที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และให้คำแนะนำที่ดียิ่งในด้านการดำเนินงานวิจัย

รศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงคำแนะนำในการวางแผนการศึกษาเป็นอย่างดี

ผศ. ดร.มงคล จิรวัชรเดช และ อ. ดร.ทนงศักดิ์ พิศาลสิน กรรมการ ที่มอบความรู้อย่างมาก และแนวคิดในหลายด้านในการวิจัย รวมทั้งคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ทุกท่าน

รศ. ดร.อำนาจ อภิชาติวัลลภ ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษาในการเขียนและตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

รศ. ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์อย่างมากในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงความรู้ในด้านวิชาการที่ท่านทุ่มเทในการสอนเป็นอย่างมาก และคำอบรมสั่งสอนที่ดี ซึ่งเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้ามาโดยตลอด “ถ้าจะทำ ต้องทำให้ได้ คนเก่งได้ตายจากโลกนี้ไปแล้ว ในโลกนี้เหลือแต่คนขยัน คนที่เหมาะสมแล้ว ถ้าพยายามจะเรียนได้”

คุณสุนทร นาคโคตร คุณเมธาวิ ศรีวัฒนพงศ์ และคุณปณิธาน ทันจันทิก เพื่อนร่วมเรียนระดับบัณฑิตศึกษาที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา เจ้าหน้าที่สถานวิจัย สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่ดูแลเอาใจใส่และอำนวยความสะดวกอย่างมากในเรื่องเอกสารต่าง ๆ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา ที่ให้ทุนสนับสนุนในการนำเสนอผลงานวิจัย รวมถึงเพื่อนบัณฑิตศึกษา และผู้มีส่วนร่วมในงานวิจัยนี้ทุกท่าน

ท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณพ่อสำเนียง-คุณแม่หนูเกียรติ พันทวี ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษา และเป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด และผู้ที่ข้าพเจ้าให้ความเคารพทุกท่าน

ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ

บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 คอนกรีตมวลเบา.....	5
2.1.1 ประวัติการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาในงานโครงสร้าง.....	5
2.1.2 การจำแนกชนิดของคอนกรีตมวลเบา.....	7
2.1.3 คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา.....	10
2.2 ปอชโซลาน.....	11
2.3 ปอชโซลานธรรมชาติ.....	19
2.4 ไคอะตอมไมท์.....	22
2.5 เพอร์ไลท์.....	31
2.5.1 ลักษณะการเกิดของหินเพอร์ไลท์.....	31
2.5.2 คุณสมบัติทางเคมีของหินเพอร์ไลท์.....	32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.3	คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของหินเพอร์ไลต์.....	34
2.5.4	การใช้ประโยชน์.....	34
2.5.5	แหล่งเพอร์ไลต์ในประเทศไทย.....	36
2.5.6	สถานการณ์เพอร์ไลต์ของประเทศไทย.....	36
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	51
3.1	การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	51
3.1.1	การทดสอบคุณสมบัติของทราย.....	51
3.1.2	การทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์.....	52
3.1.3	การทดสอบคุณสมบัติของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์.....	52
3.2	การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์.....	53
3.2.1	การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนัก.....	53
3.2.2	การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัดของมอร์ตาร์.....	53
3.2.3	ส่วนผสมและจำนวนของก้อนตัวอย่าง.....	54
4	ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล.....	57
4.1	ลักษณะทางกายภาพของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และ Type 2.....	57
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และ Type 2.....	58
4.3	ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และเพอร์ไลต์ Type 2.....	59
4.4	ความเป็นผลึกของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และเพอร์ไลต์ Type 2.....	61
4.5	ผลกระทบต่อปริมาณน้ำ.....	62
4.5.1	ผลกระทบต่อปริมาณน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์ Type 1 เป็นวัสดุผสม.....	62
4.5.2	ผลกระทบต่อปริมาณน้ำของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์ Type 2 เป็นวัสดุปอชโซลานธรรมชาติ.....	63
4.6	คุณสมบัติด้านกำลังอัด.....	64
4.6.1	กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม.....	64

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6.2	กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารป่อชโซลานธรรมชาติ.....	67
4.7	หน่วยน้ำหนัก.....	74
4.7.1	หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม.....	74
4.7.2	หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และ เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารป่อชโซลานธรรมชาติ.....	75
4.8	อัตราส่วนกำลัง.....	77
4.9	การวิเคราะห์ราคา.....	78
4.9.1	การเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตมวลเบาผสมไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์ Type 1 กับราคาคอนกรีตมวลเบาในท้องตลาด.....	78
4.9.2	การเปรียบเทียบราคาของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ที่ใช้ เป็นวัสดุป่อชโซลานธรรมชาติกับคอนกรีตทั่วไปและถั่วลอย.....	79
5	บทสรุป.....	82
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....	82
5.1.1	ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในงานคอนกรีตมวลเบา.....	82
5.1.2	ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ในการเป็นวัสดุป่อชโซลาน.....	83
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	84
	รายการอ้างอิง.....	86
	ภาคผนวก.....	86
	ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	90
	ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของมอร์ตาร์.....	98
	ภาคผนวก ค. การวิเคราะห์ราคา.....	109
	ภาคผนวก ง. บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	119
	ประวัติผู้เขียน.....	146

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ชั้นคุณภาพและชนิดของคอนกรีตมวลเบา แบ่งตาม มอก. 1505-2541.....9
2.2	ข้อกำหนดทางเคมีของปอชโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (1991)..... 13
2.3	ข้อกำหนดทางเคมีของปอชโซลานเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (1991).....13
2.4	ข้อกำหนดทางกายภาพ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (1991)..... 14
2.5	ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (1991)..... 15
2.6	คุณสมบัติของเถ้าลอยและปอชโซลานธรรมชาติ (ASTM C 618, 1991)..... 19
2.7	การวิเคราะห์ทางเคมี และคุณสมบัติทั่วไปของเถ้าลอย ตะกรัน ซิลิกาฟุ้ง ดินดานเผา และดินขาว (จันทนา สุขุมานนท์, 2550)..... 20
2.8	แสดงคุณสมบัติทางเคมีของไคอะตอมไมท์ลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008).....24
2.9	องค์ประกอบทางเคมีของไคอะตอมไมท์ประเทศกรีซ (Fragoulisa et al., 2004).....27
2.10	แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของไคอะตอมไมท์ประเทศตุรกีกับปูนซีเมนต์ (Aydin and Gul, 2007).....29
2.11	องค์ประกอบเคมีของหินเพอร์ไลต์ (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546).....33
2.12	แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์กับเพอร์ไลต์ (จิตรกร ตั้งอนุสรณ์สุข และคณะ, 2548)..... 33
2.13	การเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยเพอร์ไลต์กับปูนซีเมนต์ผสม แบบธรรมดา (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)..... 35
2.14	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของ Expanded Perlite ประเทศตุรกี (Demirboga, Orung and Gul, 2001).....39
2.15	ค่าการนำความร้อนและค่าความหนาแน่น (Demirboga and Gul, 2003).....41
2.16	ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน (Demirboga and Gul, 2003)..... 42
3.1	ส่วนผสมและจำนวนก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม.....54
3.2	ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาโดยแทนที่ทรายด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตมวลเบา.....54

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.3 ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตมวลเบา.....	55
3.4 ส่วนผสมโดยแทนที่ทรายด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ.....	55
3.5 ส่วนผสมโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ.....	56
3.6 ส่วนผสมโดยผสมเพิ่มด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ.....	56
4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของไคอะตอมไมท์เพอร์ไลต์ Type 1 และ เพอร์ไลต์ Type 2.....	57
4.2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และ เพอร์ไลต์ Type 2 ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF).....	59
4.3 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม.....	75
4.4 หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ในส่วนผสม 5, 10 และ 15% เพื่อใช้เป็นวัสดุปอชโซลานธรรมชาติ.....	76
4.5 ค่าอัตราส่วนกำลังของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ในส่วนผสม 5, 10 และ 15% เพื่อใช้เป็นวัสดุปอชโซลานธรรมชาติ.....	77
4.6 การเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม 40% กับราคาท้องตลาดทั่วไป.....	78
4.7 การเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 กับคอนกรีตทั่วไปและคอนกรีตผสมถ้ำลอย.....	80
ก.1 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของ ไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และ เพอร์ไลต์ Type 2 โดย X-Ray Fluorescence (XRF).....	91
ก.2 ค่าความถ่วงจำเพาะของไคอะตอมไมท์.....	92
ก.3 ค่าความถ่วงจำเพาะของเพอร์ไลต์ Type 1.....	93

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.4	ค่าความถ่วงจำเพาะของเพอร์ไลต์ Type 2.....94
ก.5	ตารางผลการทดสอบ Lazer Particle Size ของไคอะตอมไมท์.....95
ก.6	ตารางผลการทดสอบ Lazer Particle Size ของเพอร์ไลต์ Type 1.....96
ก.7	ตารางผลการทดสอบ Lazer Particle Size ของเพอร์ไลต์ Type 2.....97
ข.1	ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา ผสมไคอะตอมไมท์ โดยการแทนที่ทราย.....99
ข.2	ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา ผสมไคอะตอมไมท์ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์.....99
ข.3	ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา ผสมเพอร์ไลต์ โดยการแทนที่ทราย..... 100
ข.4	ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา ผสมเพอร์ไลต์ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์..... 100
ข.5	ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมไคอะตอมไมท์ เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ทราย.....101
ข.6	ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมไคอะตอมไมท์ เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์..... 101
ข.7	ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมไคอะตอมไมท์ เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการผสมเพิ่ม..... 102
ข.8	ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ทราย.....102
ข.9	ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์..... 103
ข.10	ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการผสมเพิ่ม..... 103
ข.11	ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมไคอะตอมไมท์ เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ทราย.....104

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.12 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมไคอะตอมไมท์ เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์.....	104
ข.13 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมไคอะตอมไมท์ เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการผสมเพิ่ม.....	105
ข.14 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเพอร์ไลท์ เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ทราย.....	105
ข.15 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเพอร์ไลท์ เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์.....	106
ข.16 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเพอร์ไลท์ เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการผสมเพิ่ม.....	106
ข.17 อัตราส่วนกำลังของมอร์ตาร์ผสมไคอะตอมไมท์ เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ.....	107
ข.18 อัตราส่วนกำลังของมอร์ตาร์ผสมเพอร์ไลท์ Type 2 เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ.....	108
ค.1 ราคาคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทราย 40%.....	110
ค.2 ราคาคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 40%.....	110
ค.3 ราคาคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์ Type 1 แทนที่ทราย 40%.....	111
ค.4 ราคาคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์ Type 1 แทนที่ปูนซีเมนต์ 40%.....	111
ค.5 ราคาคอนกรีต กำลังอัด 300 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน ออกแบบตามมาตรฐาน ACI.....	112
ค.6 ราคาคอนกรีต กำลังอัด 300 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน ออกแบบตามมาตรฐาน ACI และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 10%.....	113
ค.7 ราคาคอนกรีต กำลังอัด 300 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน ออกแบบตามมาตรฐาน ACI และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์ 10%.....	114
ค.8 ราคาคอนกรีต กำลังอัด 300 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน ออกแบบตามมาตรฐาน ACI และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลท์ Type 2 10%.....	115

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.9 ราคาคอนกรีต กำลังอัด 300 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน ออกแบบตามมาตรฐาน ACI และผสมเพิ่มด้วยเถ้าลอย 10%.....	116
ค.10 ราคาคอนกรีต กำลังอัด 300 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน ออกแบบตามมาตรฐาน ACI และผสมเพิ่มด้วยไคอะตอมไมท์ 10%.....	117
ค.11 ราคาคอนกรีต กำลังอัด 300 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน ออกแบบตามมาตรฐาน ACI และผสมเพิ่มด้วยเพอร์ไลต์ Type 2 10%.....	118

สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

2.1	ภาพถ่าย SEM ของเถ้านหินจากโรงไฟฟ้าอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง (ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ, 2548).....	16
2.2	ภาพถ่าย SEM ของเถ้านหินที่มีลักษณะแบบ Plerospheres (ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ, 2548).....	17
2.3	ลักษณะของไคอะตอมไมท์ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, ออนไลน์, 2543).....	22
2.4	(ก) แสดงชั้นของไคอะตอมไมท์ (สสวท., ออนไลน์, 2550).....	23
2.4	(ข) ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมท์ (สสวท., ออนไลน์, 2550).....	23
2.5	ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมท์จากแหล่งลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008).....	24
2.6	กราฟ DTA และ TGA ของไคอะตอมไมท์ลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008).....	25
2.7	ผลิตภัณฑ์มวลรวมเบา (production of lightweight aggregates, LWAs) ของ Fragoulisa et al.,(2004).....	26
2.8	ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ (Fragoulisa et al., 2004).....	27
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของคอนกรีตกับเปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม (Aydin and Gul, 2007).....	30
2.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกับเปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม (Aydin and Gul, 2007).....	30
2.11	แสดงลักษณะของหินเพอร์ไลต์ (ณรงค์ศักดิ์ นันทคำภิรา และคณะ, ออนไลน์, 2547).....	31
2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Expanded Perlite กับค่ากำลังอัด (Demirboga, Orung and Gul, 2001).....	40
2.13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับปริมาณปูนซีเมนต์ของ EPA Concrete ที่ใช้ Expanded Perlite แทนที่ปูนซีเมนต์ 30% (Topcu and Isikdag, 2007).....	45
2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกกับปริมาณปูนซีเมนต์ของ EPA Concrete ที่ใช้ Expanded Perlite แทนที่ปูนซีเมนต์ 30% (Topcu and Isikdag, 2007).....	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับปริมาณการแทนที่ Expanded Perlite ที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภท CEM I 42.5R (Topcu and Isikdag, 2007).....	47
2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกกับปริมาณการแทนที่ Expanded Perlite ที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภท CEM I 42.5R (Topcu and Isikdag, 2007).....	47
3.1 แผนผังแสดงการดำเนินงานวิจัย.....	50
3.2 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของทราย.....	51
3.3 การทดสอบการหาขนาดผลของทราย.....	52
3.4 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์.....	52
3.5 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักของ ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์.....	53
4.1 ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมท์.....	59
4.2 ภาพถ่าย SEM ของเพอร์ไลท์ Type 1.....	60
4.3 ภาพถ่าย SEM ของเพอร์ไลท์ Type 2.....	60
4.4 ผลการทดสอบ XRD ของไคอะตอมไมท์.....	61
4.5 ผลการทดสอบ XRD ของเพอร์ไลท์ Type 1 และ เพอร์ไลท์ Type 2.....	61
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับปริมาณไคอะตอมไมท์ และ/หรือเพอร์ไลท์ Type 1 ในคอนกรีตมวลเบา.....	62
4.7 ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์ และ/หรือเพอร์ไลท์ Type 2 เป็นวัสดุป่อขโชนธรรมชาติ.....	63
4.8 กราฟกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทราย.....	64
4.9 กราฟกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์.....	65
4.10 กราฟกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์ Type 1 แทนที่ทราย.....	65
4.11 กราฟกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์ Type 1 แทนที่ปูนซีเมนต์.....	66
4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลท์ Type 1 ในส่วนผสม ที่อายุการบ่ม 28 วัน.....	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 กราฟกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้โคอะคอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ทราย.....	68
4.14 กราฟกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้โคอะคอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์.....	69
4.15 กราฟกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้โคอะคอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการผสมเพิ่ม.....	70
4.16 กราฟกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ทราย.....	71
4.17 กราฟกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์.....	72
4.18 กราฟกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการผสมเพิ่ม.....	73
4.19 แสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้โคอะคอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ผสมเพิ่มในส่วนผสม 5, 10 และ 15% ที่อายุการบ่ม 28, 60 และ 90 วัน.....	74
4.20 แสดงลักษณะของ Calcium Sulfoaluminate ที่มีลักษณะเป็นแผ่น.....	76

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

มอก.	=	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
AAC	=	Autoclave Aerate Concrete
ACI	=	American Concrete Institute
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
C	=	Portland Cement Type 1
CAH	=	Calcium Aluminate Hydrate
CD5S	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ทรายด้วยโคอะตอมไมท์ 5%
CD10S	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ทรายด้วยโคอะตอมไมท์ 10%
CD15S	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ทรายด้วยโคอะตอมไมท์ 15%
CD20S	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ทรายด้วยโคอะตอมไมท์ 20%
CD25S	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ทรายด้วยโคอะตอมไมท์ 25%
CD30S	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ทรายด้วยโคอะตอมไมท์ 30%
CD40S	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ทรายด้วยโคอะตอมไมท์ 40%
CLC	=	Cellular Lightweight Concrete
CP5S	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลต์ 5%
CP10S	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลต์ 10%
CP15S	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลต์ 15%
CP20S	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลต์ 20%
CP25S	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลต์ 25%
CP30S	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลต์ 30%
CP40S	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลต์ 40%
CS	=	มอร์ตาร์ควบคุม
CSD5	=	ส่วนผสมโดยการผสมเพิ่มด้วยโคอะตอมไมท์ 5%
CSD10	=	ส่วนผสมโดยการผสมเพิ่มด้วยโคอะตอมไมท์ 10%
CSD15	=	ส่วนผสมโดยการผสมเพิ่มด้วยโคอะตอมไมท์ 15%
CSD20	=	ส่วนผสมโดยการผสมเพิ่มด้วยโคอะตอมไมท์ 20%

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

CSD25	=	ส่วนผสมโดยการผสมเพิ่มด้วยไดอะตอมไมท์ 25%
CSH	=	Calcium Silicate Hydrate
CSP5	=	ส่วนผสมโดยการผสมเพิ่มด้วยเพอร์ไลต์ 5%
CSP10	=	ส่วนผสมโดยการผสมเพิ่มด้วยเพอร์ไลต์ 10%
CSP15	=	ส่วนผสมโดยการผสมเพิ่มด้วยเพอร์ไลต์ 15%
CSP20	=	ส่วนผสมโดยการผสมเพิ่มด้วยเพอร์ไลต์ 20%
CSP25	=	ส่วนผสมโดยการผสมเพิ่มด้วยเพอร์ไลต์ 25%
D	=	Diatomite
DTA	=	Differential Thermal Analysis
EPA	=	Expanded Perlite Aggregate
FA	=	Fly Ash
HPC	=	High-Performance Concrete
LOI	=	Loss On Ignition
LWAs	=	Lightweight Aggregates
LWC	=	Lightweight Concrete
P	=	Perlite
PA	=	Pumice Aggregate
S	=	Sand
SD5C	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์ 5%
SD10C	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์ 10%
SD15C	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์ 15%
SD20C	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์ 20%
SD25C	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์ 25%
SD30C	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์ 30%
SD40C	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์ 40%
SEM	=	Scanning Electron Microscope
SF	=	Silica Fume
SP5C	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลต์ 5%

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

SP10C	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลต์ 10%
SP15C	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลต์ 15%
SP20C	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลต์ 20%
SP25C	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลต์ 25%
SP30C	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลต์ 30%
SP40C	=	ส่วนผสมโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลต์ 40%
TGA	=	Thermal Gravity Analysis
TIS	=	Thai Industrial Standard
XRD	=	X-Ray Diffraction Analysis
XRF	=	X-Ray Fluorescence

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

การผลิตคอนกรีตในปัจจุบันได้มีความเจริญก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว โดยมีทั้งการพัฒนาในด้านการออกแบบ วิธีการก่อสร้าง และวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาวัสดุผสมคอนกรีตเพื่อปรับปรุงในด้านคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้นและสามารถใช้งานได้ทุกสภาพการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นคอนกรีตในสภาพเหลวและคอนกรีตในสภาพที่แข็งตัวแล้ว คอนกรีตในงานก่อสร้างมีส่วนประกอบหลัก คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุมวลรวมละเอียด (ส่วนมากเป็นทราย) วัสดุมวลรวมหยาบ (ส่วนมากเป็นหินหรือกรวด) และน้ำ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กลายเป็นซีเมนต์เพสต์และจะยึดเกาะวัสดุมวลรวมเข้าไว้ด้วยกันเป็นคอนกรีต โดยทั่วไปคอนกรีตมีหน่วยน้ำหนักประมาณ 2,300 ถึง 2,400 kg/m³ และมีค่ากำลังอัดประมาณ 240 ksc ซึ่งหน่วยน้ำหนักที่มากเช่นนี้ถือว่ามากพอสมควรที่ทำให้โครงสร้างต้องสูญเสียกำลังส่วนหนึ่งไปกับการรองรับน้ำหนักของโครงสร้างเอง โดยเฉพาะในงานโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น อาคารสูง น้ำหนักของตัวอาคารที่ทับถมลงมาจากชั้นบนสุดจนถึงฐานรากจะมีขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาในด้านการออกแบบและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย

จากเหตุผลดังกล่าวจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาในเรื่องของวัสดุผสมในงานคอนกรีต เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีน้ำหนักน้อยลงและยังคงมีกำลังอัดที่เหมาะสมต่อการใช้งาน โดยวัสดุที่นำมาใช้มีกันอย่างแพร่หลาย ส่วนใหญ่จะเป็นมวลรวมที่มีน้ำหนักเบา หรืออาจเป็นสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม (mineral admixture) ที่มีน้ำหนักเบาที่อยู่ในกลุ่มสารปอซโซลาน (pozzolan) ตัวอย่างเช่น เถ้าลอย (fly ash) ตะกรันจากเตาถลุง (blast furnace slag) ซิลิกาฟูม (silica fume) และเถ้าแกลบ (rice husk ash) เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันวัสดุปอซโซลานเข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากในงานคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานจัดเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (alumino silicate) ที่มีซิลิกา (Si) หรือมีซิลิกา (Si) และอะลูมินา (Al) เป็นองค์ประกอบหลัก

โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมาก และมีน้ำหรือความชื้นเพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $[Ca(OH)_2]$ ที่อุณหภูมิปกติ จะได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน” วัสดุปอซโซลานเมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้ากว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานคอนกรีตขนาดใหญ่หรือคอนกรีตหยาบ และวัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในเมืองไทยมีปริมาณค่อนข้างมาก และสามารถนำมาใช้งานได้ เช่น เถ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบ และนอกจากนี้ยังมีการใช้วัสดุปอซโซลานบางชนิดที่สั่งซื้อมาจากต่างประเทศ เช่น ซิลิกาฟูมที่มีความละเอียดสูงมากในการทำคอนกรีตกำลังสูง แต่มีราคาแพงมาก (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จตุรพิทักษ์กุล, 2547)

ปอซโซลานธรรมชาติ (natural pozzolan) เป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งที่มีความน่าสนใจในการศึกษาการเป็นวัสดุปอซโซลาน (pozzolanic materials) จากการจำแนกตามมาตรฐาน ASTM C 618 จัดเป็นปอซโซลานชั้นคุณภาพ N (Class N) คือ ปอซโซลานจากธรรมชาติหรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ (อนนท์ ป้อมประสิทธิ์, 2545) ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานธรรมชาติส่วนใหญ่จะผ่านการปรับปรุง เช่น กระบวนการให้ความร้อนในเตาเผาและบดเป็นผงละเอียด ซึ่งอาจเป็นดินเผา (calcined clay) ดินดานเผา (calcined shale) และดินขาวเผา (metakaolin) (จันทนา สุขุมานนท์, 2550) ในประเทศไทยยังมีวัสดุปอซโซลานธรรมชาติอีกสองชนิดที่มีคุณสมบัติในการเป็นวัสดุปอซโซลานเช่นกัน คือ ไดอะตอมไมท์ (diatomite) และเพอร์ไลท์ (perlite) โดยจัดเป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต หรือสารอะลูมิเนียมฟอสเฟต จึงน่าจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและเพิ่มกำลังให้กับคอนกรีตในช่วงอายุปลายได้ อีกทั้งยังสามารถทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบาได้ เนื่องจากไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์มีคุณสมบัติที่ดี คือ มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ มีความพรุนสูง และจากการค้นคว้ารายงานวิจัยในต่างประเทศพบว่าได้มีการนำไดอะตอมไมท์ และเพอร์ไลท์ มาประยุกต์ใช้กับงานคอนกรีตมากมาย เช่น นำมาใช้ในงานคอนกรีตมวลเบา ทำเป็นสารผสมเพิ่มเพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลในคอนกรีต ลดปัญหาการแตกร้าว ช่วยลดการซึมผ่าน เพิ่มความทนทาน และเพิ่มกำลัง เป็นต้น แต่ในประเทศไทยยังมีการศึกษาเรื่องการนำไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ มาใช้ในงานคอนกรีตไม่มากนัก งานวิจัยครั้งนี้จึงได้นำไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์มาใช้ในการคอนกรีตซึ่งถ้าสามารถลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตให้น้อยลง โดยที่สามารถรับแรงอัดได้ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลงไปได้มาก

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อทดลองหาสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์โดยใช้โคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์เป็นส่วนผสม และทำการศึกษเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้โคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์เป็นส่วนผสม กับมอร์ตาร์ควบคุม ให้ได้มอร์ตาร์ที่มีหน่วยน้ำหนักน้อยที่สุด และมีกำลังอัดมากที่สุดที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาโครงการวิจัยได้กำหนดขอบเขตของงานวิจัย ประกอบด้วยดังนี้

1.3.1 ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ตราช้าง)

1.3.2 ทราย ใช้ทรายแม่น้ำจากจังหวัดนครราชสีมา กัดขนาดตามมาตรฐาน ASTM C 33

1.3.3 น้ำ ใช้น้ำประปาจังหวัดนครราชสีมา

1.3.4 ศึกษาการใช้โคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ Type 1 ในงานคอนกรีตมวลเบาโดยการแทนที่ทรายและปูนซีเมนต์ 0, 10, 20, 30 และ 40% และศึกษาการใช้โคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ Type 2 เพื่อใช้เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม โดยการแทนที่ทราย แทนที่ปูนซีเมนต์ และผสมเพิ่ม ที่ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

1.3.5 ใช้อัตราส่วนมอร์ตาร์ควบคุม ที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:2.75

1.3.6 ทำการหล่อก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 50×50×50 mm โดยควบคุมอัตราการไหลผ่านทุกอัตราส่วนผสมที่ร้อยละ 105 ถึง 115

1.3.7 ทดสอบเปรียบเทียบค่ากำลังอัด (compressive strength) และค่าหน่วยน้ำหนัก (unit weight) กับมอร์ตาร์ควบคุม (control mortar) โดยในการศึกษาการใช้โคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ในงานคอนกรีตมวลเบา บ่มที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน และการศึกษาสารปอซโซลานประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม บ่มที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน โดยการแช่น้ำ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงวิธีการในการทดสอบ

1.4.2 จัดหาวัสดุ อุปกรณ์ และวางแผนดำเนินการทดสอบ

1.4.3 ทดลองหาสัดส่วนผสม และดำเนินการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ผสม

1.4.4 ทำการหล่อก้อนตัวอย่างทดสอบ และดำเนินการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์

1.4.5 วิเคราะห์ผล และสรุปผลการทดสอบ

1.4.6 สรุปผลการวิจัยและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถประยุกต์ใช้วัสดุที่หาได้ในประเทศ เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีตและนำมาใช้ให้เกิดคุณค่ามากที่สุด

1.5.2 เพื่อพัฒนาวัสดุผสมคอนกรีตประเภทปอซโซลานธรรมชาติ ให้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต และได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดที่เหมาะสมสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้

1.5.3 ได้คอนกรีตที่มีน้ำหนักเบากว่าคอนกรีตมาตรฐาน ซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้

1.5.4 ช่วยลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ ลดภาวะโลกร้อน

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้ทราบข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาเปรียบเทียบการใช้โคอะคอมไมท์และเพอร์ไลท์ในงานคอนกรีตมวลเบา จึงได้ทำการศึกษาศึกษาปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องคอนกรีตมวลเบา ปอชโซลาน ปอชโซลานธรรมชาติ โคอะคอมไมท์ และเพอร์ไลท์ เพื่อหาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุปอชโซลานธรรมชาติทั้ง 2 ชนิดนี้ มาใช้เป็นวัสดุผสมมวลรวมเบาในงานคอนกรีตมวลเบา และใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติในงานคอนกรีตมวลเบา ดังนี้

2.1 คอนกรีตมวลเบา

การใช้คอนกรีตมวลรวมเบาสามารถลดต้นทุนในงานก่อสร้างได้ ไม่ว่าจะเป็นคอนกรีตบล็อกมวลเบา (light weight concrete block) หรือคอนกรีตมวลเบาในงานโครงสร้าง (structural lightweight concrete) ในขณะที่คอนกรีตมวลเบาในงานโครงสร้างอาจมีราคาต่อลูกบาศก์ที่สูงกว่าคอนกรีตธรรมดาทั่วไป แต่อาจทำให้โครงสร้างมีราคาน้อยกว่า โดยสามารถลดน้ำหนักบรรทุกตายตัวและประหยัดราคาก่อสร้างฐานรากของอาคาร ซึ่งเป็นเหตุผลพื้นฐานสำหรับการพิจารณาการใช้คอนกรีตมวลเบาในงานก่อสร้าง ส่วนในเรื่องของศักยภาพในการทำงานนั้นจะขึ้นอยู่กับกรเอาใจใส่ดูแลอย่างถูกต้องและเหมาะสม ระหว่างราคาของคอนกรีตต่อปริมาตร หน่วยน้ำหนัก และคุณสมบัติของโครงสร้างเอง คอนกรีตทั่วไปอาจจะมีราคาต่อปริมาตรค่อนข้างต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาแต่จะส่งผลให้ขนาดหน้าตัดของโครงสร้างใหญ่ขึ้น เพราะฉะนั้นอาจมีความต้องการสิ่งทีนอกเหนือจากคอนกรีต และเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต ปกติคอนกรีตมวลเบาอาจจะมีราคาต่อลูกบาศก์สูงแต่จะมีน้ำหนักเบา จึงสามารถลดน้ำหนักบรรทุกตายตัว ลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลดปริมาณการใช้เหล็กเสริม ราคาค่าแรง และไม่แบบ ซึ่งเป็นการลดราคาก่อสร้างได้

2.1.1 ประวัติการพัฒนากอนกรีตมวลเบาในงานโครงสร้าง

ก่อน ค.ศ.1917, Hayde ได้พัฒนาเตาเผา (rotary kiln) เพื่อเผาหินชนวนและดินเหนียว จึงทำให้มีการพัฒนาวัสดุมวลรวมเบา (light weight aggregate) เพื่อใช้เป็นมวลรวมในการทำคอนกรีตกำลังสูงขึ้นและมีน้ำหนักเบา ในขณะเดียวกัน Straub เป็นผู้บุกเบิกในการใช้เถ้าหินโดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมในการผลิตจนกระทั่งถึงปัจจุบัน ทำให้การค้าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเถ้าตะกรันได้เริ่มต้นขึ้นในปี ค.ศ.1928 และต่อมาในปี ค.ศ.1948 ก็ได้มีการผลิตโครงสร้างคอนกรีตที่มีคุณภาพ

ชิ้นแรกที่ทำมาจากหินชนวนมวลเบา ที่ได้จากแผ่นหินชนวนจาก Eastern Pennsylvania และอีกทั้งยังมีบันทึกว่ามีการใช้หิน Pumice ในทวีปยุโรปมาเป็นเวลานานนับศตวรรษ รวมถึงในอเมริกาตะวันตก ซึ่งในแถบนั้นมีหิน Pumice จำนวนค่อนข้างมาก และหาง่าย

ก่อนหน้านี้ได้มีการใช้คอนกรีตเสริมเหล็กมวลเบาในการก่อสร้างเรือบรรทุกท้องแบนโดยบริษัท Emergency Fleet Building Corp. เพื่อใช้ในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 1 โดยมีการออกแบบคอนกรีตด้วยการใช้หินชนวนเผาเป็นมวลรวม ต้องการให้มีกำลังอัด 350 ksc และมีหน่วยน้ำหนัก $1,760 \text{ kg/m}^3$ หรือน้อยกว่า และในระหว่างปี ค.ศ.1920s ก็ได้มีการก่อสร้างอาคารคอนกรีตมวลเบา The Park Plazo Hotel ในเมือง Kansas อีกทั้งยังมีการก่อสร้างทางด่วนยกระดับ San Francisco-Oakland Bay Bridge ซึ่งเป็นแนวทางที่สำคัญในการออกแบบสะพานที่ประหยัด และระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 ได้มีการสร้างเรือคอนกรีตมวลเบา 105 (105 lightweight concrete ships) เนื่องจากในขณะนั้นมีการอนุรักษ์เหล็กแผ่นเพื่อเอาไว้ใช้ในส่วนอื่น

ภายหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 มีตัวแทนบริษัทการเคหะแห่งชาติ (national housing agency) ได้ทำการสำรวจศักยภาพการใช้คอนกรีตมวลเบาในการสร้างที่อยู่อาศัย ซึ่งเป็นแนวทางในการศึกษาในวงกว้างของคอนกรีตที่ทำจากวัสดุมวลรวมเบา โดยได้รับการสนับสนุนจากการเคหะและสถาบันการเงินในการสร้างบ้าน (housing and home finance agency) ในขณะเดียวกัน ในปี ค.ศ. 1950s ก็ได้มีการศึกษาและดำเนินการในห้องปฏิบัติการของสถาบัน National Bureau of Standards และ The U.S. Bureau of Reclamation โดยการทำงานของ Richart and Jensen, Washa, Wendt และคณะ เพื่อพิจารณาคูณสมบัติของคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมเบาหลายชนิด และทำการศึกษเกี่ยวกับศักยภาพของโครงสร้างคอนกรีตที่ทำจากคอนกรีตมวลเบาอย่างถึถ้วน จึงทำให้เกิดความเข้าใจใหม่ ๆ เกี่ยวกับโครงสร้างคอนกรีตที่เบา ไม่ว่าจะเป็นคอสสะพาน หรือ ผลิตภัณฑ์แผ่นพื้นสำเร็จ

การก่อสร้างต่อเติมห้างสรรพสินค้า 4 ชั้น ในเมือง Cleveland ประสบปัญหาในการออกแบบ แต่ก็หาทางออกได้โดยการใช้คอนกรีตมวลเบา เนื่องจากสามารถลดน้ำหนักบรรทุกตายตัว (dead load) ได้โดยไม่จำเป็นต้องดัดแปลงฐานราก และในระหว่างปี 1950s หลากหลายโครงสร้างในประวัติศาสตร์ได้มีการออกแบบให้มีการยกระดับฐานรากขึ้น โดยการใช้คอนกรีตมวลเบาเพื่อลดน้ำหนักบรรทุกตายตัว เช่น การสร้างอาคาร 42 ชั้น Prudential Life ในเมืองชิคาโก โดยทำเป็นพื้นคอนกรีตมวลเบา หรือไม่ว่าจะเป็นโรงแรม Statler Hilton ในเมือง Dallas ก็ออกแบบโดยการใช้เฟรมคอนกรีตมวลเบาและแผ่นพื้นแบบบาง

ตัวอย่างในการประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างเหล่านี้เป็นการกระตุ้นให้มีการค้นคว้าวิจัยอย่างจริงจัง เกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาในหลายองค์กรจากนานาประเทศ โดยได้มีการเร่งให้มีการก่อสร้างโรงงานผลิตมวลรวมเบา ซึ่งในปัจจุบันมวลรวมที่มีน้ำหนักเบาและ

คุณภาพของโครงสร้างคอนกรีต ได้กลายเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดในการก่อสร้างอาคารทั้งในสหรัฐอเมริกา แคนาดา และอื่น ๆ อีกหลายประเทศ ส่งผลให้การก่อสร้างโครงสร้างหลักในเขตพื้นที่เมืองหลวงของสหรัฐอเมริกา และแคนาดา มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงปี ค.ศ. 1960s และในอนาคตเทคโนโลยีในการผลิตใหม่ ๆ จะเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตมวลรวมที่มีน้ำหนักเบา ซึ่งการผลิตมวลรวมโดยใช้ระบบใหม่นั้น จะต้องมีการทดสอบและรับรองเพื่อให้เกิดการยอมรับในการประยุกต์ใช้งานในโครงสร้างคอนกรีตต่อไป (ACI 213 R-87, 1999)

2.1.2 การจำแนกชนิดของคอนกรีตมวลเบา

1. การจำแนกคอนกรีตมวลเบาตามหน่วยน้ำหนัก สามารถแยกได้ดังนี้

1.1) คอนกรีตมวลเบาชนิดทำเป็นฉนวน (insulating lightweight concrete) มีค่าหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 315 ถึง 1,100 kg/m³ และมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ระหว่าง 7 ถึง 70 ksc

1.2) คอนกรีตมวลเบาชนิดทำเป็นโครงสร้าง (structural lightweight concrete) มีค่าหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 1,400 ถึง 1,800 kg/m³ และมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ไม่ต่ำกว่า 170 ksc

1.3) คอนกรีตชนิดกึ่งมวลเบา (semi - lightweight concrete) มีค่าหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 1,800 ถึง 2,050 kg/m³ และมีค่ากำลังอัดไม่ต่ำกว่า 220 ksc โดยส่วนใหญ่จะนำมาทำเป็นคอนกรีตบล็อกสำหรับกำแพงรั้ว และใช้เป็นวัสดุทนไฟ

2. คอนกรีตมวลเบาที่ใช้วัสดุผสมเบา วัสดุมวลรวมเบาที่ใช้ทั่วไปเป็นวัสดุผสมในคอนกรีตมวลเบาที่มีลักษณะที่สำคัญ คือ มีความพรุนสูง ทำให้ความถ่วงจำเพาะมีค่าต่ำ วัสดุผสมนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ วัสดุผสมที่ได้จากธรรมชาติ และวัสดุที่ทำเทียมขึ้น

2.1) วัสดุผสมที่ได้จากธรรมชาติ (natural aggregates) ได้แก่ หินปูน (pumice) และหินละลายชนิดเบา (scoria) ได้จากวัสดุที่บดจากลาวาภูเขาไฟ โดยนำมาผ่านกระบวนการบดและจัดขนาด โครงสร้างภายในของหินปูนมีโพรงยาวจำนวนมาก และมีสีขาวเทาแกมน้ำเงิน โดยมีสารเจือปนเป็นรอยดำสีน้ำตาลไม่ประปราย ดูดซึมน้ำได้มากและมีการหดตัวมาก มีหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 470 ถึง 870 kg/m³ คอนกรีตเบาที่ทำจากหินปูนนี้จะมีหน่วยน้ำหนักประมาณ 710 ถึง 1,420 kg/m³ มีค่ากำลังอัดต่ำประมาณ 50 ksc ส่วนหินละลายชนิดเบานั้นคล้ายคลึงกับหินปูน แต่เป็นลาวาที่มีโครงสร้างภายในใหญ่กว่า และมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอมากกว่า และเมื่อนำมาทำเป็นวัสดุผสมในคอนกรีตมวลเบาจะมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับหินปูน

2.2) วัสดุผสมที่ทำเทียมขึ้น (artificial aggregates) เป็นวัสดุที่ได้จากปฏิบัติการทางความร้อนของวัสดุต่าง ๆ เช่น เวอร์มิคิวไลต์ (vermiculite) ซึ่งเป็นสารประกอบอลูมิเนียมซิลิเกต (ไมกา) ที่มีน้ำประกอบอยู่ หรือเป็นพวก ดิน ดินดาน และหินชนวนเผา ซึ่งมีชื่อเรียกทางการค้า

ต่าง ๆ เช่น เฮย์ไคท์ (haydite) เลไลท์ (lelite) โซไลท์ (solite) และทัฟฟ์-ไลท์ (tuff – lite) หรือ อาจจะเป็นการนำหินเพอร์ไลท์ (perlite) มาผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดการขยายตัว

3. คอนกรีตมวลเบาที่ใช้สารเคมี ทำโดยใช้ผงด่างโลหะ (alkaline metal) ผสม เช่น ผงอลูมิเนียม (aluminum powder) ซึ่งเป็นสารผสมเพิ่มชนิดทำให้เกิดก๊าซ (gas-forming admixture) ใช้ผงอลูมิเนียมประมาณ 0.005 ถึง 0.02% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ผงอลูมิเนียมที่ผสมลงไปทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นผลจากการทำปฏิกิริยากับอัลคาไลไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในซีเมนต์เพสต์ ไฮโดรเจนกลายเป็นฟองอากาศเล็ก ๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 ถึง 1 mm อยู่ในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตพองตัวฟูขึ้น มีปริมาตรเพิ่มขึ้นกว่าเดิมหลายเท่า และเมื่อคอนกรีตแข็งตัวจะกลายเป็นคอนกรีตที่มีรูเล็ก ๆ อยู่ข้างในมากมาย คอนกรีตที่ได้เรียกว่า โฟมคอนกรีต (aerated or foam concrete) โฟมคอนกรีตอาจผลิตโดยไม่มีทรายผสมอยู่ก็ได้ โฟมคอนกรีตที่ไม่มีทรายผสมจะเบากว่าน้ำถึงสามเท่า คือ มีหน่วยน้ำหนักเพียง 200 ถึง 300 kg/m³ ประโยชน์ใช้ทำฉนวนกันความร้อน แต่หากมีทรายผสมด้วยจะหนัก 500 ถึง 1,100 kg/m³ นอกจากนี้อาจมีการใช้ผงสังกะสี (zinc powder) หรือไฮโดรเจนเพอออกไซด์ (hydrogen peroxide) ก็ได้ (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

ปัจจุบันได้มีการทำขึ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ (autoclave aerated concrete) สำหรับงานก่อสร้างภายในประเทศไทยเพื่อส่งเสริมอุตสาหกรรมประเภทนี้ จึงมีการกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมขึ้น โดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หรือ มอก. (Thai Industrial Standard, TIS) โดยได้มีประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2411 (พ.ศ.2541) ออกตามความในมาตรา 15 แห่งพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ.2511 เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมขึ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ โดยรัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม ออกประกาศกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมขึ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ มาตรฐานเลขที่ มอก. 1505-2541 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ กำหนดรายละเอียดของขึ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ ซึ่งเป็นวัสดุก่อผนังมวลเบาโดยมีฟองอากาศกระจายอย่างสม่ำเสมอภายในเนื้อคอนกรีต และอบด้วยไอน้ำโดยกำหนดชั้นคุณภาพและชนิด ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน วัสดุและการทำ คุณสมบัติที่ต้องการ การบรรจุ เครื่องหมายและฉลาก การเก็บคอนกรีตมวลเบา การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน แต่การทดสอบมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ครอบคลุมเฉพาะผลิตภัณฑ์ขึ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศกระจายอย่างสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีต และอบในเตาอบไอน้ำ และไม่เสริมเหล็ก เพียงเท่านั้น

ขึ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ ตามความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ เรียกว่า “คอนกรีตมวลเบา” หมายถึง คอนกรีตที่มีมวลเบากว่า

คอนกรีตทั่วไปที่มีขนาดเดียวกัน โดยมีฟองอากาศเล็ก ๆ แทรกกระจายในเนื้อคอนกรีตอย่างสม่ำเสมอ ทำให้แข็งแรงด้วยการอบไอน้ำ และไม่เสริมเหล็ก เหมาะสำหรับใช้ก่อผนังด้วยวิธีก่อ

คอนกรีตมวลเบาตาม มอก. 1505-2541 สามารถแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดของคอนกรีตมวลเบาตามความต้านแรงอัดออกเป็น 4 ชั้นคุณภาพ และแบ่งตามความหนาแน่นเชิงปริมาตร ออกเป็น 7 ชนิด โดยชั้นคุณภาพและชนิดของคอนกรีตมวลเบามีความสัมพันธ์กัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 (มอก. 1505-2541)

ตารางที่ 2.1 ชั้นคุณภาพและชนิดของคอนกรีตมวลเบา แบ่งตาม มอก. 1505-2541

ชั้นคุณภาพ	ความต้านทานแรงอัด (N/mm ²)		ชนิด	ความหนาแน่นเชิงปริมาตรเฉลี่ย
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด		(kg/m ³)
2	2.5	2.0	0.4	310 ถึง 400
			0.5	410 ถึง 500
4	5.0	4.0	0.6	510 ถึง 600
			0.7	610 ถึง 700
			0.8	710 ถึง 800
6	7.5	6.0	0.7	610 ถึง 700
			0.8	710 ถึง 800
8	10.0	8.0	0.8	710 ถึง 800
			0.9	810 ถึง 900
			1.0	910 ถึง 1,000

จากข้อมูลตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541 แสดงให้เห็นว่ามีการรับรองมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเฉพาะที่เป็นคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ ส่วนคอนกรีตมวลเบา หรือคอนกรีตบล็อกมวลเบาชนิดอื่นยังไม่มีการรับรอง อาจจะเป็นผลเนื่องมาจากคอนกรีตมวลเบาชนิดอื่นยังไม่มีการศึกษาอย่างจริงจัง แต่ในอนาคตอาจจะมีการรับรองประเภทอื่นเพิ่มขึ้น

คอนกรีตมวลเบาที่ทำขึ้นจากวัสดุผสมต่าง ๆ กัน จะมีค่าหน่วยน้ำหนักต่างกันมาก ซึ่งอาจมีหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 300 ถึง 1,850 kg/m³ และมีค่ากำลังอัดตั้งแต่ 3 ถึง 400 ksc ค่ากำลังอัดขึ้นอยู่กับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ถ้าหน่วยน้ำหนักสูงกำลังอัดก็สูงด้วย ปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ก็มีส่วนต่อกำลังอัดของคอนกรีตเช่นกัน กล่าวคือ ถ้าต้องการกำลังอัด 210 ksc จะต้องใช้

ปูนซีเมนต์ 235 ถึง 400 กิโลกรัมต่อคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร หรือถ้าต้องการกำลังอัด 310 ksc ต้องใช้ปูนซีเมนต์ 300 ถึง 490 กิโลกรัมต่อคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตร

2.1.3 คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา

- ค่าการดูดซึมน้ำ (absorption) คอนกรีตมวลเบามีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าคอนกรีตธรรมดา เนื่องจากมีรูพรุนมากกว่า

- การหดตัว (shrinkage) คอนกรีตมวลเบามีการหดตัวมากกว่าคอนกรีตธรรมดา ประมาณ 5 ถึง 40% แต่คอนกรีตมวลเบาที่ใช้วัสดุผสมซึ่งเป็นผลผลิตจาก ดินเผา ดินดาน หรือ ตะกรัน จะหดตัวน้อยลง

- การคืบ หรือการล้า (creep) คอนกรีตมวลเบาอาจล้ามากกว่าคอนกรีตธรรมดา

- ค่าปัวซองเรโซ (poisson ratio) ของคอนกรีตมวลเบาเท่ากับคอนกรีตธรรมดา แต่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) จะมีค่าประมาณ 1/2 ถึง 3/4 เท่า ของคอนกรีตธรรมดา เมื่อมีค่ากำลังอัดประลัยเท่ากัน

- คอนกรีตมวลเบาเก็บเสียงได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่ถ้าตัดแปลงผิวหน้าของคอนกรีตเสียใหม่ แทนที่จะเก็บเสียง คอนกรีตมวลเบานี้จะกลายเป็นฝาสำหรับสะท้อนเสียงได้สูงมากเช่นกัน

- สัมประสิทธิ์การขยายตัวของคอนกรีตมวลเบาประมาณ 7×10^{-6} ถึง 14×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส ซึ่งน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา

- คอนกรีตมวลเบามีความต้านทานเพลิงไหม้ได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

จากข้อมูลของ ACI 213 R-87 (1999) และ วินิต ช่อวิเชียร (2544) เป็นที่น่าสังเกตว่า ดินและดินเหนียว สามารถนำมาเผาเพื่อให้เกิดการขยายตัวและสามารถนำมาทำวัสดุผสมมวลรวมเบาในการทำคอนกรีตมวลเบาได้ โดยมีรายงานวิจัยสนับสนุนในเรื่องนี้ของ ศิริรัตน์ รัตนจันทร์ (2543) ซึ่งได้ทำการศึกษาเบื้องต้นในการเตรียมวัสดุเพื่อผสมทำคอนกรีตที่มีน้ำหนักเบา เพื่อหาความเป็นไปได้ในการเตรียมมวลรวมเบาจากดินที่มีในท้องถิ่น ศึกษาโดยการนำดินไปเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อให้ขยายตัว เพื่อให้มีรูพรุนขนาดเล็กในโครงสร้างทำให้มีน้ำหนักเบา ซึ่งดินที่นำมาศึกษา คือ ดินในเขตมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2 ชนิด ได้แก่ ดินสีแดงและดินสีขาว โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาส่วนผสมและอุณหภูมิในการเผาที่เหมาะสม ศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของเม็ดดินเผาและทดลองเบื้องต้นในการเตรียมคอนกรีตมวลเบา จากการศึกษาพบว่ามวลรวมเบาเตรียมได้จากส่วนผสมดินแดงร้อยละ 70 ถึง 90 และเผาที่อุณหภูมิ $1,250^{\circ}\text{C}$ เมื่อดินผ่านกระบวนการเผาแล้วพบว่ามีค่าการดูดซึมน้ำระหว่างร้อยละ 1.83 ถึง 13.17 ค่าความถ่วงจำเพาะ

อิมตัวผิวแห้ง มีค่าระหว่าง 1.31 ถึง 1.99 และหน่วยน้ำหนักระหว่าง 796 ถึง 1,066.73 kg/m³ ส่วนค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่าเท่ากับ 333.66 ถึง 547.6 ksc จึงสามารถสรุปได้ว่า ดินเมื่อผ่านกระบวนการเผาจะสามารถขยายตัวได้จริง เมื่อนำมาเป็นวัสดุผสมคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบา และมีค่ากำลังอัดที่สามารถนำไปใช้งานได้ ดังนั้นถ้าต้องการเผาวัสดุชนิดอื่นที่ได้จากธรรมชาติ เพื่อที่จะทำการศึกษาการเป็นวัสดุมวลรวมเบาจึงน่าจะเป็นไปได้ แต่ต้องคำนึงถึงราคาต้นทุนในการผลิต และความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานด้วย

2.2 ปอชโซลาน

ตามรายงานของ อนนท์ ป้อมประสิทธิ์ (2545) ได้มีการบันทึกไว้ว่า ปอชโซลาน เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างตั้งแต่สมัยโบราณกว่า 2,000 ปี และในปัจจุบันก็ยังเป็นที่นิยมใช้กันอยู่ในสมัยโบราณได้นำเอาวัสดุพวกปอชโซลาน เช่น มีการนำเถ้าจากภูเขาไฟมาผสมกับปูนขาวเพื่อผลิตเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (hydraulic cement) โดยใช้ปอชโซลาน 2 ส่วน ต่อปูนขาว 1 ส่วน มาใช้ในการก่อสร้าง โดยมีไขมัน นม และเลือดจากสัตว์เป็นวัสดุผสมเพิ่ม เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการใช้งาน และสิ่งก่อสร้างที่ทำจากปอชโซลานนั้นก็ยังมีความคงทนมาจนถึงทุกวันนี้

มาตรฐาน ASTM C 618 ให้คำจำกัดความของวัสดุปอชโซลานไว้ว่า “วัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอชโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอชโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน” (ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

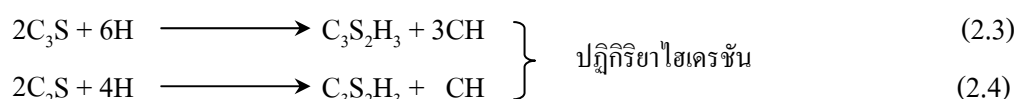
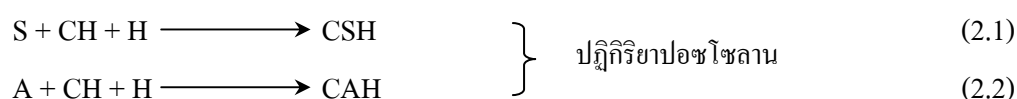
วัสดุปอชโซลาน เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีต หรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น วัสดุปอชโซลานที่ใช้ในงานคอนกรีตมีอยู่หลายชนิด เช่น เถ้าถ่านหิน ซิลิกาฟูม เถ้าแกลบ นอกจากนี้ยังวัสดุปอชโซลานที่สามารถทำปฏิกิริยาล้ำกับปูนซีเมนต์ได้ คือ ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ซึ่งเป็นวัสดุประเภทกึ่งปอชโซลานและกึ่งซีเมนต์

ในการปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างของคอนกรีตสามารถใช้วัสดุบางชนิดผสมเพิ่มเติมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ วัสดุเฉื่อย (inert materials) วัสดุซีเมนต์ (cementing materials) และ วัสดุปอชโซลาน (pozzolanic materials) การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตที่ขาดมวลรวมที่ค่อนข้างละเอียด ที่เกิดปัญหาการแยกตัว และไม่เหมาะสมในการลำเลียงโดยการสูบส่งหรือการเทโดยใช้ท่อ หรือต้องการเพิ่มการเกาะตัวของคอนกรีตสามารถทำได้โดยการใช่วัสดุเฉื่อยจำพวก หินปูนบดละเอียด ทรายละเอียด และหินฝุ่น เป็นต้น การใช่วัสดุเฉื่อย

ละเอียดผสมเพิ่มในคอนกรีตยังช่วยลดการเย็นน้ำและการตกแตงผิวของคอนกรีตทำได้ง่ายขึ้น ปูนซีเมนต์ผสมที่นิยมใช้ในการก่ออิฐและฉาบได้มาจากการบดปูนเม็ดกับวัสดุละเอียด การใช้วัสดุละเอียดเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์จะลดกำลังของคอนกรีตเพราะปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ดังนั้นจึงไม่ควรใช้ในงานโครงสร้างของอาคารซึ่งต้องรับแรงสูง

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2547) ยังบันทึกไว้ว่า วัสดุซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน นอกจากใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตเช่นเดียวกับการใช้วัสดุละเอียดแล้วยังทำให้คอนกรีตมีกำลังและความทนทานดีขึ้นด้วย วัสดุซีเมนต์ได้แก่ ปูนซีเมนต์ธรรมดาและตะกั่วเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นปูนซีเมนต์ในตัวเองแล้วยังสามารถใช้ทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ได้ ดังนั้นเมื่อทำปฏิกิริยาเคมีจะให้สารประกอบของ CSH และ CAH เหมือนกับปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกต (tricalcium silicate, C_3S) และ ไดแคลเซียมซิลิเกต (dicalcium silicate, C_2S) แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะช้ากว่า และกำลังในช่วงแรกจะต่ำกว่าปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนทำให้ปริมาณ C_3S , C_2S , ไตรแคลเซียมอลูมินेट (tricalcium aluminate, C_3A) และ เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (tetracalcium aluminoferrite, C_4AF) ในคอนกรีตลดลง การทำปฏิกิริยาของสารซีเมนต์จะช้าลง การคายความร้อนจากปฏิกิริยาจะชะลอตัวออกไป ปฏิกิริยาหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมวัสดุปอซโซลานและน้ำจะเกิดขึ้นระหว่าง SiO_2 และ Al_2O_3 กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $[Ca(OH)_2]$ ที่ได้จากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำ ดังแสดงในสมการที่ 2.1 และ 2.2 เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในสมการ 2.3 และ 2.4 (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)



วัสดุปอซโซลานเมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และถึงแม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันแต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้ากว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานคอนกรีตขนาดใหญ่หรือคอนกรีตหนา วัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในเมืองไทยมีปริมาณที่ค่อนข้างมากและสามารถนำมาใช้งานได้ เช่น ถ้ำถ่านหินและ

เถ้าแกลบ นอกจากนี้ยังมีการใช้วัสดุปอชโซลานบางชนิดที่สั่งซื้อมาจากต่างประเทศ เช่น ซิลิกาฟูม ที่มีความละเอียดสูงมากในการทำคอนกรีตกำลังสูง เป็นต้น (ปริญญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

ตาม ASTM C 618 (1991) ได้จำแนกปอชโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่

1) ชั้นคุณภาพ N (class N) เป็นปอชโซลานจากธรรมชาติหรือปอชโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ (อนนท์ ป้อมประสิทธิ์, 2545)

2) ชั้นคุณภาพ F (class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผากถ่านหินแอนทราไซต์ (anthracite) หรือบิทูมินัส (bituminous) โดยมีปริมาณผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 (1991) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ถึง 2.5 ซึ่งโดยทั่วไปเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F มีปริมาณ CaO ที่ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนียวและควอร์ตซ์ เนื่องจากถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี SiO_2 สูง สำหรับวิธีการเก็บตัวอย่างและการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของปอชโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (1991)

ข้อกำหนดทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3), ไอร์รอนออกไซด์ (Fe_2O_3) ไม่น้อยกว่าร้อยละ	70.0	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ไม่เกินร้อยละ	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, ไม่เกินร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกินร้อยละ	10.0	6.0	6.0

หมายเหตุ 1. สารปอชโซลานชั้นคุณภาพ N เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ

2. สามารถใช้เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ที่มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาส่งถึงร้อยละ 12 ได้ ถ้ามีผลของการใช้งานหรือผลของการทดสอบที่เชื่อถือได้

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางเคมีของปอชโซลานเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (1991)

ข้อกำหนดทางเคมีเพิ่มเติม	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na_2O , ไม่เกินร้อยละ	1.5	1.5	1.5

หมายเหตุ ใช้สำหรับระบุคอนกรีตที่มีมวลรวมทำปฏิกิริยาและต้องใช้ซีเมนต์ที่มีปฏิกิริยาอัลคาไลไม่เกินกำหนด

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางกายภาพ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (1991)

ข้อกำหนดทางกายภาพ	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ความละเอียด : - ปริมาณที่ค้ำแรงเบอร์ 325 ^A ร่อนโดยใช้น้ำ, ไม่เกินร้อยละ <i>ดัชนีกำลัง เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์</i> - ที่อายุ 7 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม 75 ^B - ที่อายุ 28 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม 75 ^B - ความต้องการน้ำ, สูงสุดร้อยละของส่วนผสมควบคุม 115	34 75 ^B 75 ^B 115	34 75 ^B 75 ^B 105	34 75 ^B 75 ^B 105
ความคงตัว (soundness)^C - การขยายตัวหรือหดตัวของโตะเคลฟ, ไม่เกินร้อยละ ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ^D - ความหนาแน่น, ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ - ร้อยละที่ค้ำแรงเบอร์ 325, ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	0.8 5 5	0.8 5 5	0.8 5 5

หมายเหตุ A ระวังไม่ให้มีผลละเอียดที่เกาะตัวกันเป็นก้อนค้ำบนแรง

B เป็นไปตามข้อกำหนดเมื่อดัชนีกำลังที่อายุ 7 วัน หรือ 28 วัน เป็นไปตามข้อกำหนด

C ถ้ามีสารปอซโซลานผสมเกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ในคอนกรีต ชิ้นส่วนทดสอบของการขยายตัวของโตะเคลฟควรมีสารปอซโซลานอยู่ร้อยละของสารซีเมนต์ตามนั้น

D ความหนาแน่น (density) และความละเอียดของตัวอย่างต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้านี้หรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้านี้ทั้งหมด ถ้าทดสอบไม่ถึงสิบตัวอย่าง

3) ชั้นคุณภาพ C (class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์ (lignite) หรือซับบิ-ทูมินัส (subbituminous) เป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 50 มีปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618, (1991) เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำ ทำให้เถ้าลอย Class C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้ว ยัง Al_2O_3 ต่ำด้วย (ACI 232.2R-96, 2000)

เถ้าลอย Class C นอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานแล้วยังมีคุณสมบัติเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง เนื่องจากมีปริมาณ CaO สูง เถ้าลอยแม่เมาะในระยะแรกส่วนใหญ่เป็นเถ้าลอย CaO สูง โดยมีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 40 และมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง (ปริญญญา จินดาประเสริฐ

และอินทรชัย หอวิจิตร, 2548) แต่ในปัจจุบันถ้ำลอยแม่เมาะมีปริมาณ CaO ต่ำลง โดยมีสารนี้อยู่ประมาณร้อยละ 10 (Parinya Chindaprasirt et al., 2001 and Chai Jaturapitakkul et al., 2004)

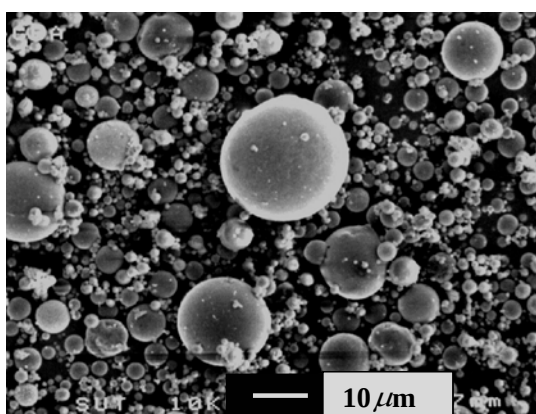
ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (1991)

ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติม	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
แฟกเตอร์ผลคูณ (multiple factor) ของ LOI กับปริมาณที่ค้าง แรงเบอร์ 325 เมื่อร่อนโดยใช้น้ำ, ไม่เกินร้อยละ		255	
การหดตัวแห้งที่ 28 วัน ที่เพิ่มขึ้นของแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม, ไม่เกินร้อยละ	0.3	0.3	0.3
ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ เมื่อใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ปริมาณสารกักกระจายฟอง อากาศที่ทำให้มีปริมาตรอากาศร้อยละ 18 จะต้องไม่แตกต่าง จากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้านี้หรือค่าเฉลี่ย ของตัวอย่างก่อนหน้านี้ทั้งหมด ถ้าทดสอบไม่ถึงสิบตัวอย่าง, ไม่เกินร้อยละ	20	20	20
ประสิทธิภาพในการควบคุมปฏิกิริยาอัลคาไลของมวลรวม การขยายตัวที่ 14 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ ทำด้วยปูนซีเมนต์อัลคาไลต่ำ, ไม่เกินร้อยละ	100	100	100
ประสิทธิภาพในการช่วยต้านทานสารซัลเฟต วิธีที่ 1 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ - สภาวะซัลเฟตปานกลาง 6 เดือน, ไม่เกินร้อยละ - สภาวะซัลเฟตสูง 6 เดือน, ไม่เกินร้อยละ วิธีที่ 2 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ - เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ ทนซัลเฟตในสภาวะซัลเฟต 6 เดือน, ไม่เกินร้อยละ	0.10 0.05 100	0.10 0.05 100	0.10 0.05 100

วัสดุจำพวกปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีที่มาจาก 2 แหล่ง ซึ่งได้แก่ ปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ และปอซโซลานที่ได้จากขบวนการผลิต (artificial pozzolan) ปอซโซลานที่มาจากธรรมชาติ ได้แก่ ไคอะตอมมาเซียสเอิร์ธ หรือไคอะตอมไมท์ (diatomaceous earth or diatomite)

เถ้าภูเขาไฟ เปลือกหอย หินภูเขาไฟ วัสดุเหล่านี้เมื่อนำไปใช้งานจะต้องนำไปผ่านกระบวนการต่าง ๆ ก่อนจึงจะนำไปใช้งานได้ เช่น กระบวนการเผา การบด และการทำให้แห้ง เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำเอาปอชโซลานจากธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ในการสร้างเขื่อนและสะพาน เพื่อช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ ช่วยเพิ่มความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากซัลเฟต และช่วยในการควบคุมปฏิกิริยาระหว่างด่างกับซิลิกา นอกจากนี้ยังมีผลพลอยได้ในการลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอีกทางหนึ่งด้วย

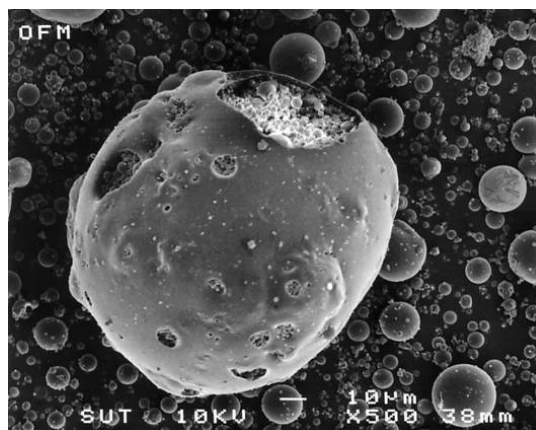
ปอชโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต ได้แก่ เถ้าลอยที่เป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหินที่ถูกบดในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าลอยประกอบด้วยอนุภาคทรงกลม ซึ่งมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบที่สำคัญประมาณ 66 ถึง 68% เถ้าลอยบางชนิดสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับปูนขาวและด่าง เกิดเป็นสารประกอบที่มีแรงยึดประสาน แต่เถ้าลอยบางชนิดก็สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและแข็งตัวได้เช่นเดียวกัน เถ้าถ่านหินโดยทั่วไปแล้วจะมีความละเอียดใกล้เคียงหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์เพียงเล็กน้อยโดยลักษณะทั่วไปจะเป็นรูปทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 micron จนถึง 0.15 mm ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าอำเภอแม่เมะ จังหวัดลำปาง
(ธีรวัฒน์ สีนศิริ, 2548)

เถ้าถ่านหินที่กลวงมีน้ำหนักเบาและอาจจะลอยน้ำได้เรียกว่าเถ้าถ่านหินกลวง (cenospheres) และในบางครั้งภายในเถ้าถ่านหินที่มีรูพรุนอาจมีเถ้าถ่านหินขนาดเล็ก ๆ อยู่ภายในก็ได้เรียกว่า plerospheres ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินจะขึ้นอยู่กับ การบดถ่านหิน ชนิดของเครื่องบด และชนิดของเตาเผา ถ่านหินละเอียดมากขึ้นและเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเตาเผา จะได้เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงและมีทรงกลม แต่ในกรณี

ที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ รูปร่างของเถ้าถ่านหินจะไม่แน่นอน สำหรับเถ้าถ่านหินในประเทศไทยพบว่า ความละเอียดของเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าที่เหมาะสม ซึ่งทดสอบโดยวิธีของเบลน โดยมีความละเอียดอยู่ในช่วง 2,500 ถึง 3,500 cm²/g (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2543; สุรพล พฤษยานุกุล, 2546; Chindaprasirt, 2001 อ้างถึงใน ปริญญญา จินดาประเสริฐ, 2547)



รูปที่ 2.2 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าถ่านหินที่มีลักษณะแบบ Plerospheres (ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ, 2548)

การวัดความละเอียดของเถ้าถ่านหินมี 2 วิธีที่นิยมใช้กันคือวิธีการร่อนผ่านแรงเบอร์ 325 (ช่องเปิด 45 micron) กับวิธีวัดพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักโดยวิธีของเบลน ในสหรัฐอเมริกาใช้วิธีการร่อนผ่านแรงเป็นวิธีมาตรฐานวิธีเดียวในการกำหนดความละเอียดของเถ้าถ่านหิน กล่าวคือ เถ้าถ่านหินต้องมีขนาดของอนุภาคที่ร่อนผ่านแรงเบอร์ 325 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก เถ้าถ่านหินที่ละเอียดขึ้นจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นและทำให้กำลังอัดคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถวัดได้โดยใช้ค่าดัชนีกำลัง (strength activity index) ดังแสดงในสมการที่ 2.5

$$\text{ดัชนีกำลังของมอร์ตาร์} = (A/B) \times 100 \quad (2.5)$$

โดย A = กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 20
B = กำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานซึ่งไม่มีเถ้าถ่านหินในส่วนผสม

มาตรฐาน ASTM C 618 ได้กำหนดค่าดัชนีกำลังของเถ้าถ่านหินทั้ง Class F และ Class C ต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 7 หรือ 28 วัน

ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ หลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซิลิกาและอลูมินาออกไซด์ที่อยู่ในเถ้าถ่านหินจะทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งสารประกอบทั้งสองมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีการยึดประสานดีขึ้น และเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุระหว่าง 7 ถึง 14 วัน และมีปฏิกิริยาไปเรื่อย ๆ นอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อเถ้าถ่านหินมีความละเอียดมากขึ้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

การใช้ปอซโซลานในงานคอนกรีตมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ เพิ่มความสามารถในการเทได้ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ลดการหดตัว ลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และที่สำคัญคือเพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น แต่ทั้งนี้การใช้ปอซโซลานจะมีข้อเสียด้วย คือ ทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น ลดความต้านทานต่อสถานะการแข็งตัวและละลายน้ำสลับกันไป และทำให้ต้องใช้สารเพิ่มฟองอากาศมากขึ้นเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศตามต้องการในระดับเดียวกับคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าถ่านหินผสมอยู่ (Lane and Best, 1982 อ้างถึงใน ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าประโยชน์สูงสุดของเถ้าลอยคือ การสร้างเขื่อน ซึ่งที่เห็นอย่างเป็นรูปธรรม คือ โครงการเขื่อนคลองท่าด่าน นอกจากนั้นเป็นการนำเถ้าลอยมาใช้ในการทำดอม่อของอาคารผู้โดยสารที่สนามบินสุวรรณภูมิ โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ประมาณ 50% ทั้งนี้ผู้ใช้งานจะต้องมีความรู้และสามารถทดสอบคุณสมบัติของเถ้าลอยว่าสามารถนำมาใช้งานได้จริง ๆ รวมทั้งการสร้างท่อน้ำเสีย ซึ่งหากนำเถ้าลอยเป็นส่วนผสมในการผลิตท่อน้ำเสีย จะทำให้ท่อน้ำเสียการใช้งานยืนยาวมากกว่าท่อปกติหลายเท่า เนื่องจากท่อที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะมีคุณสมบัติต้านทานน้ำเสียได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา อีกทั้งการก่อสร้างในโครงการขนาดใหญ่หรือตึกสูง คอนกรีตที่ใช้ควรจะมีส่วนผสมของเถ้าลอย เพื่อให้เนื้อคอนกรีตลื่นไหลสามารถส่งลำเลียงคอนกรีตด้วยท่อขึ้นไปตามชั้นต่าง ๆ ของการก่อสร้างได้ดีกว่าคอนกรีตทั่วไป

ที่ผ่านมามีการนำเข้าเถ้าลอยจากต่างประเทศ เนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าลอยในขณะนั้นยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่ามีปัญหาหรือไม่ เช่น ค่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_3) เมื่อช่วงที่ทำวิจัยแรก ๆ พบว่ามีค่าสูงถึง 12 ถึง 15% ซึ่งตามปกติ จะต้องไม่เกิน 3% จึงไม่แน่ใจว่าจะสามารถนำเถ้าลอยมาใช้ได้ เพราะเกรงว่าจะเสี่ยงต่อการก่อสร้างอาคารสูง แต่ปัจจุบันมั่นใจคุณภาพของเถ้าลอยได้ เนื่องจากค่า SO_3 ไม่เกิน 2% (จิรภัทร ขำญาติ, 2546)

2.3 ปอชโซลานธรรมชาติ

วัสดุปอชโซลานธรรมชาติได้ถูกนำมาใช้หลายร้อยปีมาแล้ว คำว่า “ปอชโซลาน” มาจากถ้ำภูเขาไฟของหมู่บ้านปอชซูลิ (pozzuoli) ใกล้กับเมืองเนเปิล ประเทศอิตาลี โดยในปีคริสต์ศักราช 79 เกิดการระเบิดของภูเขาไฟวิซุเวียส (viesuvius) แต่อย่างไรก็ตามก่อนคริสต์ศักราช 2000 ได้มีการนำถ้ำภูเขาไฟและดินเผา มาใช้ในงานก่อสร้างมากมายที่ โรม กรีก อินเดีย และอียิปต์ โดยโครงสร้างคอนกรีตผสมวัสดุปอชโซลานยังคงสามารถยืนหยัดให้เห็นได้จนถึงปัจจุบันนี้จึงเป็นหลักฐานแสดงให้เห็นถึงความทนทานของการใช้วัสดุปอชโซลาน ต่อมาในตอนต้นศตวรรษที่ 20 ได้มีการนำวัสดุปอชโซลานธรรมชาติมาใช้ในอเมริกาเหนือ ในโครงการก่อสร้างสาธารณูปโภค เช่น การสร้างเขื่อน ซึ่งการใช้วัสดุปอชโซลานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตขนาดใหญ่ และเป็นการเพิ่มปริมาณวัสดุซีเมนต์ นอกจากการใช้วัสดุปอชโซลานเพื่อควบคุมความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นแล้ว วัสดุปอชโซลานยังช่วยเพิ่มความต้านทานต่อซัลเฟตอีกด้วย วัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุชนิดแรกที่ถูกพบว่าช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา ในคอนกรีต ปัจจุบันวัสดุปอชโซลานธรรมชาติส่วนใหญ่จะผ่านการปรับปรุง เช่น กระบวนการให้ความร้อนในเตาเผาและบดเป็นผงละเอียด ซึ่งอาจเป็นดินเผา (calcined clay) ดินดานเผา (calcined shale) และดินขาว (metakaolin) ซึ่งดินขาวที่กล่าวถึงนี้เป็นดินเผาพิเศษ ผลิตโดยเอาดินเหนียวขาวล้วนมาเผาที่อุณหภูมิต่ำ หลังจากนั้นจึงบดจนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 1 ถึง 2 micron ดินขาวนำมาใช้ในงานที่ต้องการความซึมผ่านที่ต่ำ หรือต้องการกำลังที่สูง ดินขาวได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในคอนกรีตมากกว่านำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยทั่วไปจะใส่เพิ่มในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของเถ้าลอยและปอชโซลานธรรมชาติ (ASTM C 618, 1991)

Class F	เถ้าลอย ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นปอชโซลานิก
Class C	เถ้าลอย ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นปอชโซลานิก และวัสดุประสานในซีเมนต์
Class N	ปอชโซลานธรรมชาติที่ถูกเผาหรือมีลักษณะหยาบ ประกอบด้วย : Diatomaceous Earths (diatomite) Opaline Cherts และ ดินดาน Tuffs และ ถ้ำภูเขาไฟ หรือพิมิไซท์ ดินเผา รวมทั้งดินขาว และดินดาน

วัสดุปอชโซลานจากธรรมชาติถูกจำแนกโดยมาตรฐาน ASTM C 618 โดยจำแนกเป็นวัสดุปอชโซลาน Class N ดังตารางที่ 2.6 ซึ่งได้กำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาวัสดุปอชโซลานธรรมชาติ ส่วนตารางที่ 2.7 แสดงผลการวิเคราะห์ทางเคมีและคุณสมบัติของวัสดุปอชโซลาน และวัสดุปอชโซลานอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง (จันทนา สุขุมานนท์, 2550)

ตารางที่ 2.7 การวิเคราะห์ทางเคมี และคุณสมบัติทั่วไปของเถ้าลอย ตะกรัน ซิลิกาฟุ้ง ดินดานเผา และดินขาว (จันทนา สุขุมานนท์, 2550)

สารประกอบ	ปริมาณสารประกอบ (%)					
	เถ้าลอย Class F	เถ้าลอย Class C	ตะกรัน บด	ซิลิกา ฟุ้ง	ดินดาน เผา	ดินขาว
SiO ₂	52	35	35	90	50	53
Al ₂ O ₃	23	18	12	0.4	20	43
Fe ₂ O ₃	11	6	1	0.4	8	0.5
CaO	5	21	40	1.6	8	0.1
SO ₃	0.8	4.1	9	0.4	0.4	0.1
Na ₂ O ₃	1.0	5.8	0.3	0.5	-	0.05
K ₂ O	2.0	0.7	0.4	2.2	-	0.4
Total Na (eq. Alk)	2.2	6.3	0.6	1.9	-	0.3
Loss On Ignition (LOI)	2.8	0.5	1.0	3.0	3.0	0.7
Blaine Fineness, cm ² /g	4,200	4,200	4,000	200,000	7,300	190,000
Relative Density	2.38	2.65	2.94	2.40	2.63	2.50

เมื่อนำดินไปผ่านกระบวนการเผาที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลานธรรมชาติในงานก่อสร้างได้เช่นกัน ซึ่งจากรายงานของ จันทนา สุขุมานนท์ (2550) พบว่า ดินเผาสามารถเอามาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน โดยทั่วไปจะใช้แทนที่ในช่วงประมาณระหว่าง 15 ถึง 35% เพื่อช่วยเพิ่มความต้านทานต่อสารละลายซัลเฟต ควบคุมปฏิกิริยาระหว่างอัลคาไลกับมวลรวม และลดค่าการซึมผ่านของน้ำ ดินเผามีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.40 ถึง 2.61 และมีความละเอียดด้วยวิธีเบลนประมาณ 6,500 ถึง 13,500 cm²/g ส่วนดินดานเผามีปริมาณแคลเซียม 5 ถึง 10% ซึ่งค่าแคลเซียมที่มีอยู่ทำให้วัสดุนั้นมีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสานหรือเป็นไฮดรอลิกซีเมนต์ (hydraulic cement) ในตัวเอง เนื่องจากปริมาณของกากแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นเผาไม่สมบูรณ์ และดินดานเผามี

ปริมาณโมเลกุลน้ำในเม็ดดินสะสมอยู่จึงทำให้มีค่าสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition, LOI) ค่อนข้างมาก คือ มีค่า LOI ประมาณ 1 ถึง 5% โดยค่า LOI สำหรับดินดานเผาไม่ได้แสดงปริมาณคาร์บอนเหมือนกับกรณีของเถ้าลอย

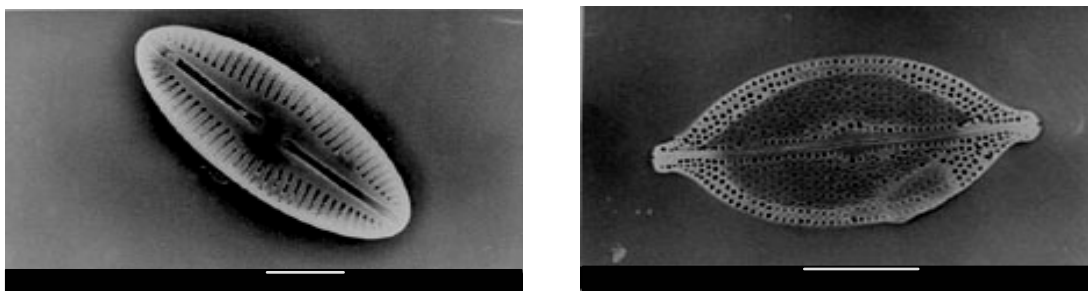
จากงานวิจัยในอดีตในเรื่องของการนำเอาปอชโซลานธรรมชาติมาใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตของ Shannag and Shania (2003) ที่ศึกษาความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตสมรรถนะสูง (sulfates resistant of high-performance concrete, HPC) โดยได้มีการออกแบบส่วนผสมของ HPC จำนวน 5 ส่วนผสม แล้วแช่ตัวอย่างมอร์ตาร์ในสภาวะรุนแรงต่าง ๆ ได้แก่ ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (magnesium sulfates, $MgSO_4$) และสารละลายโซเดียมซัลเฟต (sodium sulfates, $NaSO_4$) ที่ความเข้มข้น 20% และยังเปรียบเทียบการแช่ในน้ำทะเล จากทะเลแดง (Red Sea) น้ำจากทะเลเดดซี (Dead Sea) และน้ำธรรมชาติ โดยในแต่ละสภาวะได้ทำการทดลองกับส่วนผสมของ HPC ทั้ง 5 ส่วนผสม และทำการทดสอบกำลังอัด จากการวิจัยได้พบว่า หลังจากแช่ตัวอย่างทดสอบในสารละลายซัลเฟตและในน้ำทะเลที่สภาวะต่าง ๆ คอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่ม 15% และสารปอชโซลานธรรมชาติ 15% มีความสามารถในการต้านทานซัลเฟตได้สูงที่สุด สำหรับ HPC ที่ผสมซิลิกาฟุ่ม และสารปอชโซลานธรรมชาติ มีความเหมาะสมทั้งในด้านกำลังอัดและความทนทาน โดยแนะนำให้ใช้กับคอนกรีตในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการกำลังและความทนทานสูง ส่วน HPC ที่มีเฉพาะปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาประเภทที่ 1 นั้น มีความทนทานต่อซัลเฟตและน้ำทะเลต่ำ

Pekmezci and Akyz (2004) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณปอชโซลานธรรมชาติที่มีต่อคอนกรีต ศึกษาโดยการทดสอบคอนกรีตทั้งหมด 15 ส่วนผสม โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตควบคุมที่มีปริมาณซีเมนต์ 300, 350 และ 400 kg/m^3 และได้ดัดแปลงส่วนผสมเพื่อศึกษาเปรียบเทียบโดยลดปริมาณซีเมนต์ลงเป็น 250, 300 และ 350 kg/m^3 ของคอนกรีตควบคุม และได้เพิ่มปริมาณปอชโซลานธรรมชาติเข้าไปแทนที่ปูนซีเมนต์ 40, 50, 75 และ 100 kg/m^3 และได้พบว่าการเพิ่มปริมาณสารปอชโซลานธรรมชาติที่มากเกินไปจะส่งผลทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตลดต่ำลง จึงควรใช้ในปริมาณที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตที่สูงที่สุด และ Pekmezci (2004) ยังพบอีกว่า ในกรณีที่มีการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม แล้วแทนที่ด้วยปอชโซลานธรรมชาตินั้น ส่งผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงเช่นกัน เนื่องจากปอชโซลานธรรมชาติไม่มีคุณสมบัติในการเป็นสารซีเมนต์ (cementitious material) และเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าสารปอชโซลานธรรมชาติจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเกิดจากผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเช่นกัน ในกรณีนี้ถ้าต้องการเพิ่มปริมาณปอชโซลานในส่วนผสมก็ควรจะเพิ่มปริมาณซีเมนต์ให้มากขึ้นด้วย จึงจะส่งผลทำให้การใช้ปริมาณปอชโซลานในปริมาณที่

มากมีประสิทธิภาพได้ โดยที่อัตราส่วนระหว่าง Pozzolan ต่อ Cement, (P/C) ratio ที่ 0.28 เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ได้คอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด

2.4 ไดอะตอมไมท์

ไไดอะตอม (diatom) เป็นพืชเซลล์เดียวขนาดเล็กมาก มีผนังเป็นฝาชิลิกาประกบกัน บางชนิดว่ายน้ำได้ บางชนิดอาศัยกระแสน้ำพัดพาไป มีขนาดตั้งแต่ 2 ถึง 2,000 micron ขนาดใหญ่น้อย พบในแหล่งน้ำทั่วโลกทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม เมื่อไไดอะตอมตายลงเปลือกที่เป็นซิลิกาจะตกเป็นตะกอนสะสมกันจำนวนมากหาศาลบนพื้นทะเลหรือพื้นทะเลสาบ แล้วในที่สุดจะกลายเป็นไไดอะตอมไมท์ (diatomite) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ดินเบา (diatomaceous earth) เพราะมีลักษณะเป็นดิน เกิดจากซากไไดอะตอมในแหล่งอะตอม เป็นดินซุย เบา เนื้อพรุน มีลักษณะคล้ายขอล็ก มีปฏิกิริยาเชิงซ้ำ และเป็นตัวนำความร้อนที่เลว ไไดอะตอมไมท์จะมีลักษณะต่าง ๆ กัน ตามแต่ชนิดของไไดอะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (เสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา, 2538)



รูปที่ 2.3 ลักษณะของไไดอะตอมไมท์ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, ออนไลน์, 2543)

ไไดอะตอมไมท์บางทีอาจใช้คำว่า เรดิโอลาเรียนเอิร์ธ (radiolarian earth) เพราะมีโครงสร้างประกอบด้วยโอปอลของไไดอะตอมและเรดิโอลาเรียน มีสีขาวหรือสีครีมเป็นส่วนใหญ่ แต่ก็อาจพบสีเหลืองอ่อน สีแดง หรือสีน้ำตาลบ้าง (เสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา, 2538) แต่บางครั้งก็พบว่าไไดอะตอมไมท์เป็นซากสัตว์ขนาดเล็กที่เป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว หรือเป็นสาหร่ายเซลล์เดียวที่มีเปลือกหุ้มที่เป็นซิลิกา เปลือกเหล่านี้เมื่อทับถมกันมาก ๆ จะสามารถคงสภาพของซากอยู่ในชั้นหินได้เป็นเวลานาน จนแข็งตัวอัดกันแน่นจนกลายเป็นหิน (สสวท., ออนไลน์, 2550)

แหล่งดินเบาในประเทศไทยพบอยู่ในจังหวัดลำปาง โดยจะพบเป็นแหล่งเล็กใหญ่กระจายอยู่เป็นบริเวณกว้างในแอ่งลำปาง และแอ่งเล็ก ๆ ใกล้เคียง ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในเขตอำเภอเมืองลำปาง อำเภอแม่ทะ และอำเภอเกาะคา นอกจากนั้นยังสามารถพบได้บ้างในบริเวณบ้านแม่แก้ว

อำเภอสบปราบ และบ้านทุ่งตุ่น ตำบลวอแก้ว อำเภอกันทร จังหวัดลำปาง จากการสำรวจของ กองเศรษฐธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี บริเวณแอ่งลำปาง สามารถประเมินปริมาณสำรองของ ดินเบาได้ทั้งหมดประมาณ 245 ล้านตัน (กรมทรัพยากรธรณี, ออนไลน์, 2548) จากรายงานของ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้มีการเก็บตัวอย่างสำรวจในบริเวณ เหมือนบ้านฟ่อน จังหวัดลำปาง พบว่าชั้นของไคอะตอมไมท์จะทับถมยึดกันแน่นอยู่ได้ชั้นกรวดทราย ซึ่งมีระดับความลึกไม่ต่างกันมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) และเมื่อนำไคอะตอมไมท์ไป ถ่ายภาพขยาย 350 เท่า ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) แล้วทำการตรวจสอบ พบว่าไคอะตอมไมท์มีอายุ ตั้งแต่ 25 ล้านปีที่ผ่านมจนถึงปัจจุบัน และยังรายงานอีกว่าสามารถพบได้ในชั้นตะกอนบริเวณที่ลุ่ม อำเภอศรีมโหสถ จังหวัดปราจีนบุรี อีกด้วย (สสวท., ออนไลน์, 2550)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.4 (ก) แสดงชั้นของไคอะตอมไมท์ (สสวท., ออนไลน์, 2550)

(ข) ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมท์ (สสวท., ออนไลน์, 2550)

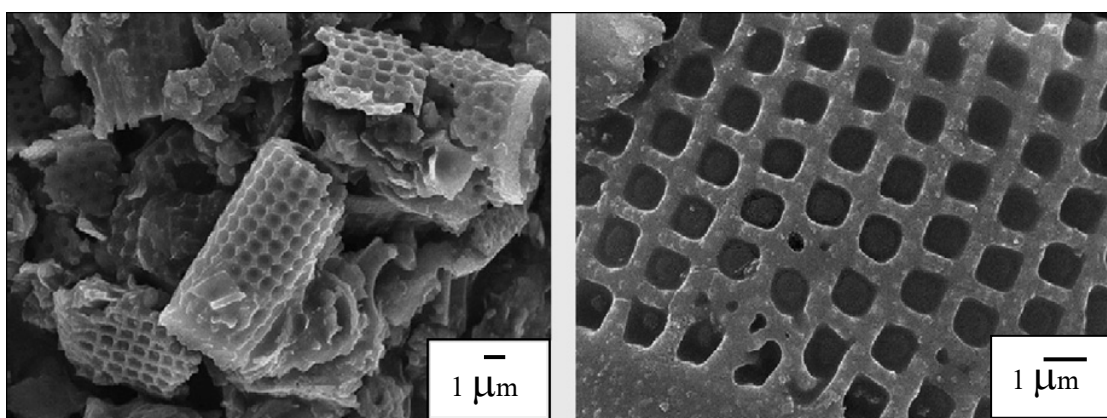
โดยทั่วไปไคอะตอมไมท์มีประโยชน์ในทางด้านอุตสาหกรรม คือ ใช้เป็นส่วนผสมในการทำกระดาช เพื่อให้เนื้อกระดาชแน่นเนียน ทำเป็นฉนวนและเป็นสารที่ใช้ในการกรองได้ดี เช่น กรองน้ำตาลและสารอื่น ๆ หรือใช้ขัดโลหะได้ดีเพราะมีซิลิกาที่มีอนุภาคนาละเอียดอยู่ภายใน (เสรีวัฒน์ สมิทธิ์ปัญญา, 2538) หรือใช้ในอุตสาหกรรม ดัมกลั่น ทำปูนขาว และเซรามิก เป็นต้น (สสวท., ออนไลน์, 2550)

ไคอะตอมไมท์ไม่ใช่เพียงแต่มีประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมเพียงเท่านั้น แต่ในการก่อสร้างก็ยังมีการนำเอาไคอะตอมไมท์มาใช้ประโยชน์มากมาย เช่น นำมาใช้เป็นวัสดุผสมใน

คอนกรีตมวลเบา หรืออิฐมวลเบา เป็นต้น ซึ่งจากการศึกษาของ Kedrarin Pimraksa และ Prinya Chindaprasirt (2008) ได้รายงานว่า ไคอะตอมไมท์ (ดินเบาลำปาง) จากจังหวัดลำปาง ประเทศไทย มีปริมาณค่อนข้างมากถึง 100 ล้านตัน จึงได้ทดลองทำการศึกษาคุณสมบัติของอิฐมวลเบาที่ทำจาก ไคอะตอมไมท์ลำปาง ปูนขาว และยิปซัม เป็นส่วนผสม เนื่องจากได้พบว่าไคอะตอมไมท์จาก แหล่งลำปางมีคุณสมบัติในการเป็นสารปอซโซลานสามารถนำมาทำอิฐมวลเบาได้ เนื่องจากมี สารประกอบออลูมิโนซิลิเกต โดยมีปริมาณออกไซด์หลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ในปริมาณที่เหมาะสม และยังมีความพรุนสูง เช่นเดียวกับสารปอซโซลานธรรมชาติทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 2.8 และ รูปที่ 2.5

ตารางที่ 2.8 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของไคอะตอมไมท์ลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008)

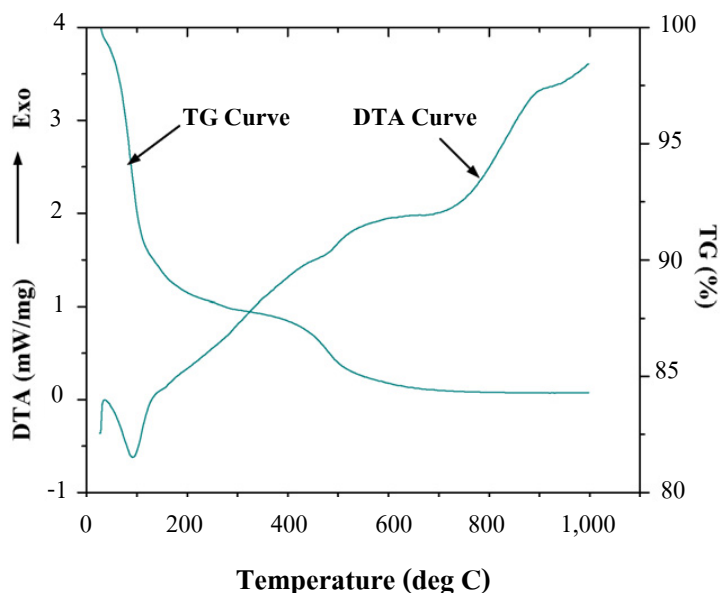
Oxide Compositions	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	TiO_2	P_2O_5	SO_3
(%) by mass	77.5	14.16	5.24	2.08	0.20	0.00	0.46	0.53	0.25	0.01



รูปที่ 2.5 ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมท์จากแหล่งลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008)

ไคอะตอมไมท์จากแหล่งลำปาง มีปริมาณออกไซด์หลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มีค่า 77.5, 14.6 และ 5.24% ตามลำดับ ซึ่งกล่าวได้ว่าไคอะตอมไมท์นี้จัดเป็นปอซโซลานธรรมชาติ Class N ตามการจำแนกตามมาตรฐาน ASTM C 618 และจากภาพถ่าย SEM จะเห็นอนุภาคที่มีลักษณะแบบ ทรงกระบอก ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) ประมาณ $32\text{ }\mu\text{m}$ มีโครงสร้างผนังเป็นตารางคล้ายรังผึ้ง ขนาดของช่องประมาณ $1\text{ }\mu\text{m}$ มีพื้นที่ผิวที่สูงถึง $170,000\text{ cm}^2/\text{g}$ จึงทำให้ไคอะตอมไมท์นี้มีน้ำหนัก เบาและมีความพรุนสูง และจากกราฟ Differential Thermal Analysis (DTA) และ Thermal Gravity

Analysis (TGA) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ของไคอะตอมไมท์ลำปางที่ผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 500°C จะทำให้มีน้ำหนักที่เบาลง มีค่าการสูญเสียน้ำหนักในช่วง 450 ถึง 500°C และจะค่อย ๆ คงที่เมื่ออุณหภูมิเกินกว่า 500°C โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะที่ 0.7



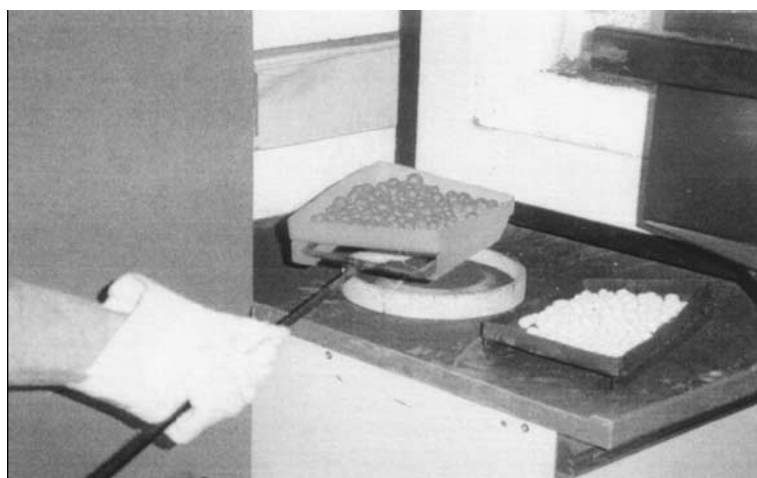
รูปที่ 2.6 กราฟ DTA และ TGA ของไคอะตอมไมท์ลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008)

การศึกษาของ Kedsarin Pimraksa (2008) ได้นำไคอะตอมไมท์มาผสมกับปูนขาวร้อยละ 15 และขี้ปซัมร้อยละ 5 หล่อตัวอย่างขนาด $3.5 \times 7.5 \times 15$ cm และใช้เครื่องอัดเข้าแบบที่มีแรงกดอัดประมาณ 35 ksc บ่มที่อุณหภูมิห้องระหว่าง 27 ถึง 28°C โดยแปรผันระยะเวลาการบ่ม 3, 5, 6, 7 และ 11 วัน และบ่มด้วยตู้อบไอน้ำความดันสูง (autoclave) ที่ความดันประมาณ 0.14 MPa อุณหภูมิ 130°C ต่ออีก 4 ชั่วโมง จากผลการทดสอบพบว่าส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำ 50% ได้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด 147.8 ksc และมีหน่วยน้ำหนัก $1,020 \text{ kg/m}^3$ ที่อายุการบ่ม 6 วัน แต่เมื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่านี้จะให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่า เนื่องจากเป็นปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สามารถทำให้อิฐที่ทำจากไคอะตอมไมท์นี้มีความหนาแน่นมากที่สุด จึงส่งผลให้ได้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด

เมื่อพิจารณาค่ากำลังอัด และภาพถ่าย SEM ของอิฐที่ทำการแปรผันการเผาไคอะตอมไมท์ที่อุณหภูมิ 0, 200, 350, 500 และ 700°C พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาไคอะตอมไมท์ที่สามารถทำได้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด คือ 500°C มีค่ากำลังอัด 177.4 ksc ค่าหน่วยน้ำหนัก 730 kg/m^3 และมีโครงสร้าง phases ที่ดีกว่า แต่เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น 700°C จะส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง เหลือเพียง 127.4 ksc และมีโครงสร้าง phases ไม่ค่อยหนาแน่นเท่าที่ควร ซึ่งน่าจะเป็นผล

เนื่องจากอุณหภูมิในการเผาที่สูงเกินไปอาจจะทำให้ปริมาณสารประกอบหลักบางอย่างในไคอะตอมไมท์สูญเสียไปด้วย อย่างไรก็ตามในการทำอิฐที่มีส่วนผสมของไคอะตอมไมท์ที่ไม่ได้ผ่านการเผาก็สามารถทำได้ โดยมีค่ากำลังอัดประมาณ 147.8 ksc และมีหน่วยน้ำหนัก 880 kg/m^3

งานวิจัยในต่างประเทศก็มีการนำไคอะตอมไมท์มาใช้ในการงานคอนกรีตมวลเบาเช่นกัน โดยจากงานวิจัยของ Fragoulisa et al. (2004) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุผสมมวลรวมเบา (lightweight aggregates) ในคอนกรีตมวลเบา ซึ่งใช้ไคอะตอมไมท์จากประเทศกรีซเป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์มวลรวมเบา (production of lightweight aggregates, LWAs) โดยนำไคอะตอมไมท์ที่มีขนาดเล็กกว่า $100 \mu\text{m}$ และขี้เลื่อยดิบ (saw dust) ขนาดประมาณ 1 mm ผสมไคอะตอมไมท์ 20 kg ผสมกับขี้เลื่อยดิบที่ปริมาณ 2, 3.5 และ 5% ใช้ปริมาณน้ำต่อขี้เลื่อยดิบ (W/S) ≤ 0.5 จากนั้นป้อนเป็นก้อนกลม (pellets) ขนาด 5 ถึง 20 mm ดังแสดงในรูปที่ 2.7 แล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ $1,100^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 12 ถึง 15 นาที และทำการทดสอบเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์มวลรวมเบา LWAs ของประเทศเดนมาร์กและเยอรมัน



รูปที่ 2.7 ผลิตภัณฑ์มวลรวมเบา (production of lightweight aggregates, LWAs)
ของ (Fragoulisa et al.,2004)

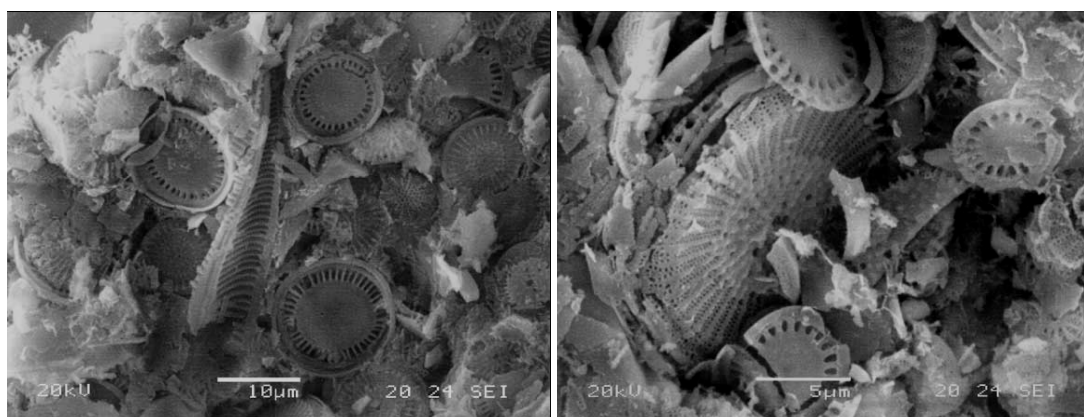
จากผลการทดสอบ X-Ray Fluorescence (XRF) ของไคอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ พบว่ามีปริมาณออกไซด์หลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันแล้วมากกว่า 70% ดังแสดงในตารางที่ 2.9 และมีค่า LOI ไม่มากกว่า 10% ซึ่งค่า LOI ที่สูญเสียไปนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียไคอะตอมไมท์เนื่องจากการเผา เพราะไคอะตอมไมท์เกิดขึ้นจากการทับถมเป็นเวลานานจึงมีส่วนประกอบของดินเหนียวปะปนอยู่ รวมทั้งผนังเซลล์ของไคอะตอมไมท์ประกอบด้วยซิลิกาที่มีปริมาณน้ำ ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)

อยู่ด้วย และจะมีปริมาณมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบของผนังเซลล์ และจากการทดสอบ SEM ของไคอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ พบว่ารูปแบบของผนังเซลล์ที่ประกอบด้วยซิลิกานนั้นค่อนข้างสมบูรณ์ มีลักษณะทรงกระบอก แบบจาน หรือคล้ายเรือ มีขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 5 ถึง 30 μm ดังแสดงในรูปที่ 2.8

ตารางที่ 2.9 องค์ประกอบทางเคมีของไคอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ (Fragoulisa et al., 2004)

Component	GRE-1 (%)	GRE-3 (%)
Na ₂ O	1.28	0.48
K ₂ O	2.58	1.92
CaO	1.82	1.35
MgO	1.79	1.81
MnO	n.a.	n.a.
Fe ₂ O ₃	8.08	5.90
TiO ₂	n.a.	n.a.
Al ₂ O ₃	17.83	16.68
SiO ₂	59.52	64.04
P ₂ O ₅	n.a.	n.a.
LOI	7.37	8.06
Total	100.27	100.20

n.a. = not analysed.



รูปที่ 2.8 ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ (Fragoulisa et al., 2004)

ตัวอย่าง LWAs ของประเทศกรีซที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วส่วนใหญ่จะยังคงรูปร่างเป็นทรงกลมเช่นเดิม มีสีน้ำตาลแดง เนื้อสีเป็นเนื้อเดียวกันทั้งก้อน แต่มีบางก้อนที่มีลักษณะคล้ายหัวกะหล่ำปลี และจากการเผาทำให้ pellets บางก้อนขยายตัวเป็นรูเล็ก ๆ หรือมีรอยแยกเล็ก ๆ ที่ผิว และจากผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัดและความหนาแน่นพบว่ามีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกับ LWAs ของประเทศเดนมาร์กและเยอรมัน และในบางอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมทั้งขนาดและส่วนผสม ผลิตภัณฑ์ LWAs ของกรีซ จะได้ค่าความหนาแน่นที่สูงกว่าและสามารถรับแรงกดได้ดีกว่า LWAs ของประเทศเดนมาร์กและเยอรมัน คือ ที่อัตราส่วนที่ใช้ไคอะตอมไมท์ 20 kg ปริมาณซีลีเนียม 5% อัตราส่วน W/S น้อยกว่า 0.5 สามารถรับแรงกดได้ 2,029 g มีค่าความหนาแน่น 0.93 g/cm^3 โดยที่ LWAs ของประเทศเดนมาร์กและเยอรมัน สามารถรับแรงกดได้เพียง 580 g และ 986 g มีค่าความหนาแน่น 0.65 g/cm^3 และ 0.73 g/cm^3 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความสามารถในการรับแรงกดกับค่าความหนาแน่นแล้วพบว่า LWAs ของประเทศกรีซ มีคุณสมบัติในการรับแรงกดที่ดีกว่า LWAs ของประเทศเดนมาร์กและเยอรมัน ที่ขนาดเท่ากัน คือ ที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ถึง 10 mm ส่วนค่าความพรุนจะมีค่าลดลงและมีการกระจายตัวของช่องว่างดีกว่า ลักษณะของโพรงมีทั้งขนาดเล็กแบบเหลี่ยมคมและกลมมน คล้ายรวงผึ้ง มีขนาดตั้งแต่ 2 ไปจนถึง 500 micron และมีโครงสร้างที่เป็นแบบอสัณฐาน

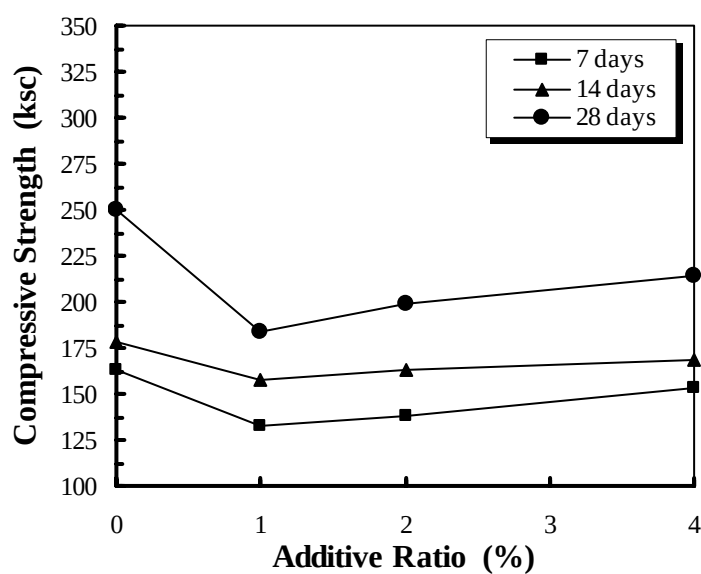
เมื่อทำการเปรียบเทียบจากงานวิจัยของ Pimraksa (2008) ทำให้ทราบว่าไคอะตอมไมท์ในแต่ละแหล่งจะมีรูปร่างและปริมาณออกไซด์หลักที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาการทับถม แหล่งกำเนิด และชนิดของไคอะตอม ดังนั้นในการศึกษาควรคำนึงถึงทั้งลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของไคอะตอมไมท์ในแต่ละแหล่งกำเนิด รวมถึงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติที่ดีของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

Aydin and Gul (2007) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาการก่อตัว และคุณสมบัติเชิงกลบางประการของคอนกรีต ที่เกิดจากการนำวัสดุธรรมชาติที่ได้จากการระเบิดของภูเขาไฟมาใช้ในการผสม ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการแทนที่ด้วยไคอะตอมไมท์ กับหินพัมมิช โดยนำวัสดุ 2 ชนิด แทนที่ซีเมนต์ 1, 2 และ 4% ใช้คอนกรีตควบคุมที่ถูกรออกแบบโดยมาตรฐาน ACI ที่มีปริมาณซีเมนต์ 300 kg/m^3 ค่ายุบตัวเฉลี่ย 5 cm และเมื่อทำการทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของไคอะตอมไมท์กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 2.10 พบว่าไคอะตอมไมท์ มีปริมาณสารประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เมื่อรวมกันแล้วมีค่ามากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติในการเป็นวัสดุปอซโซลาน

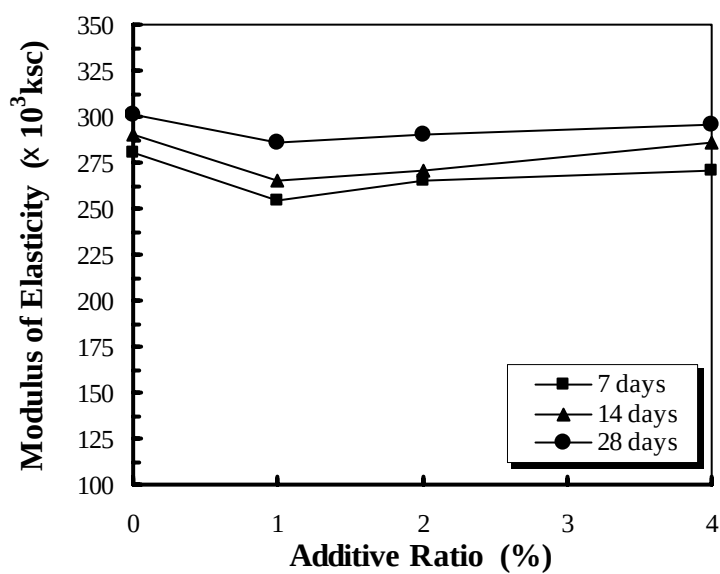
ตารางที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของไคอะตอมไมท์ประเทศตุรกีกับปูนซีเมนต์
(Aydin and Gul, 2007)

Component	Cement (%)	Diatomite (%)
SiO_2	17.69	77.14
Al_2O_3	3.59	1.6
Fe_2O_3	5.89	3.9
CaO	57.69	1.96
MgO	3.39	1.2
SO_3	2.57	-
K_2O	0.3	-
TiO_2	0.2	-

จากข้อมูลผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของ Aydin (2007) ด้านกำลังอัด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้ไคอะตอมไมท์ในส่วนผสม ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และ 2.10 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ไคอะตอมไมท์ผสมเพิ่มเข้าไปในส่วนผสม 1, 2 และ 4% จะทำให้ค่ากำลังอัดลดลงเหลือเพียง 73.5, 79.6 และ 85.7% และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเหลือเพียง 90.9, 96.6 และ 98.3% ที่อายุการบ่ม 28 วัน ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่ากำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่างปริมาณการผสมเพิ่มทั้งสามกับคอนกรีตควบคุม พบว่าค่ากำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณไคอะตอมไมท์เพิ่มขึ้น อีกทั้งกำลังอัดจะแปรผันตามอายุการบ่มและมีการพัฒนากำลังอัดที่ดีกว่าคอนกรีตควบคุมเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณ SiO_2 ของไคอะตอมไมท์ ที่มีอยู่ในส่วนประกอบมากถึง 77.14% ที่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับ Ca(OH)_2 ในช่วงอายุการบ่มที่สูงขึ้น และยังพบอีกว่าการเพิ่มปริมาณไคอะตอมไมท์จะส่งผลให้ความต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้น และทำให้ระยะเวลาการก่อตัวขึ้นต้นและขึ้นปลายสูงขึ้นเนื่องจากไคอะตอมไมท์มีพื้นที่ผิวมากและอนุภาคค่อนข้างละเอียด



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของคอนกรีตกับเปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม
(Aydin and Gul, 2007)



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกับเปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม
(Aydin and Gul, 2007)

2.5 เพอร์ไลต์

หินเพอร์ไลต์ หมายถึงหินภูเขาไฟเนื้อแก้วทุกชนิด เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสม ในเวลาที่รวดเร็วจะขยายตัว มีน้ำหนักเบา และมีความพรุนสูง หินเพอร์ไลต์ ดังรูปที่ 2.11 ได้แก่ หินภูเขาไฟเนื้อแก้ว ที่มีลักษณะรอยแตกเป็นวงซ้อนกันคล้ายกลีบหัวหอม และเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมในเวลาที่รวดเร็วจะขยายตัวออกไปได้ ตั้งแต่ 4 ถึง 20 เท่าของปริมาตรเดิม ทำให้เปลี่ยนสภาพเป็นสารที่มีน้ำหนักเบา มีความพรุนสูง และมีลักษณะคล้ายหินพัมมิส สารที่ได้จากการขยายตัวของหินเพอร์ไลต์นี้ เรียกว่า “เพอร์ไลต์” (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของหินเพอร์ไลต์ (ณรงค์ศักดิ์ นันทคำภีรา และคณะ, ออนไลน์, 2547)

เพอร์ไลต์ที่พบในประเทศไทยมี 3 ชนิด คือ

- 1) สีเขียวแถบแดง (banded perlite) เพอร์ไลต์สีเขียวเนื้อประสานอัดแน่น จุดสีขาวทั่วไป คือ Feldspar เนื้อเดิมเป็น Glass แล้วแปรสภาพมาเป็นแถบแดง ๆ ที่เรียกว่า Red Devitrification Product
- 2) เพอร์ไลต์สีเขียว (classical perlite) เป็นเพอร์ไลต์เนื้ออัดแน่นมีผลึกสีเขียว ถ้าดูด้วยกล้องขยายจะพบรอยแตกร้าวโค้งไปโค้งมา คือ Perlite Crack และยังมีจุดขาว Feldspar รวมอยู่ด้วย แร่เพอร์ไลต์ชนิดนี้ถือว่ามีความปลอดภัย ขยายตัวได้สูง แต่อุณหภูมิการขยายตัวอาจแตกต่างกัน
- 3) เพอร์ไลต์สีขาว (pumicious perlite) ประกอบไปด้วยเส้นใยของแก้ว (glass fiber) สีค่อนข้างขาว มีรูพรุนสูง อาจมี Feldspar ปะปนอยู่ด้วยเล็กน้อย และมีการขยายตัวอยู่บ้างเล็กน้อย

2.5.1 ลักษณะการเกิดของหินเพอร์ไลต์

เพอร์ไลต์จัดอยู่ในประเภทหินอัคนีพุ มีเนื้อละเอียดเป็นแก้ว เนื่องจากเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของหินหนืด เป็นแร่องค์ประกอบร่วมกับหินไรโอไลต์ ที่เกิดในระดับตื้น และมี

การยื่นตัวอย่างรวดเร็ว บริเวณที่พบในประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดลพบุรี และกาญจนบุรี ประโยชน์ใช้เป็นส่วนผสมวัสดุก่อสร้างน้ำหนักเบา และเป็นส่วนเติมเต็มในอุตสาหกรรมปูนและอุตสาหกรรมสี (ณรงค์ศักดิ์ นันทคำภีรา และคณะ, ออนไลน์, 2547)

หินเพอร์ไลต์เกิดเป็น Effusive Rock แทรกเข้ามาในชั้น Pumicious Tuffs ซึ่งเข้าใจว่าจะมีน้ำอยู่ในรูปพูนค่อนข้างมาก ภายหลังจากที่ Magma แทรกเข้ามาและเย็นตัวเป็นแก้วภูเขาไฟ แล้ว น้ำที่อยู่ในชั้น Tuff จะค่อย ๆ แทรกซึมลงไปรวมกับแก้วภูเขาไฟ ซึ่งแต่เดิมมีน้ำอยู่เพียง 1 ถึง 2% กลับเพิ่มมากขึ้นเป็น 3 ถึง 5% พร้อม ๆ กับเกิดการขยายตัว และแตกเป็นรูปเปลือกของหัวหอม (peritic crack) ขึ้น สำหรับ Pumicious Perlite มีลักษณะการเกิดที่แสดงให้เห็นถึงการถูกความกดดัน และการระเหยหนีไปของ Volatile ที่ละลายปนอยู่ใน Magma ขณะเคลื่อนตัวขึ้นมาใกล้ผิวโลก ด้วยขณะที่เกิดยังเป็นของเหลวอยู่ แรงดันและแรงระเหยหนีของ volatile ผ่านช่องว่างที่มีอยู่อย่างจำกัด จึงเกิดการริดเป็นเส้นใยแก้วมีรูปพูนสูง แล้วจึงดูดซับน้ำเข้าไปในเนื้อ ซึ่งเชื่อว่าเป็นปริมาณเพียงเล็กน้อย การขยายตัวของเพอร์ไลต์ชนิดนี้จึงค่อนข้างต่ำ แก้วภูเขาไฟมีลักษณะใสไม่สามารถคงตัวอยู่ได้นาน ๆ อาจเป็นเพราะแรงกดดันเนื่องจากมีน้ำหนักหินปิดทับและมีน้ำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา บางส่วนของแก้วจึงเปลี่ยนเป็น Feldspar กับ Quartz ขนาดเล็ก ๆ อยู่ด้วยกันและมักจะมีสีแดง เรียกว่า Devitrified Glass หรือ Spherulite (กรมทรัพยากรธรณี, ออนไลน์, 2548)

2.5.2 คุณสมบัติทางเคมีของหินเพอร์ไลต์

หินเพอร์ไลต์เป็นหินภูเขาไฟเนื้อแก้ว ที่มีส่วนประกอบของออกไซด์ของธาตุซิลิกา ค่อนข้างสูง ประมาณร้อยละ 70 หรือมากกว่า และยังมีน้ำเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 2 ถึง 5 โดยปกติไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารเคมีอื่น ๆ ได้ง่ายนัก จึงจัดอยู่ในจำพวกสารเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี เนื้อแก้วของหินเพอร์ไลต์จะมีการเปลี่ยนสภาพแก้วเป็นผลึก (diversification) เมื่อระยะเวลา (อายุ) ของหินเพอร์ไลต์มากขึ้น ดังนั้นหินเพอร์ไลต์ที่จะมีคุณภาพดีและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้นั้น เนื้อแก้วจะต้องไม่เปลี่ยนสภาพแก้วเป็นผลึก ซึ่งจะพบได้ในหินภูเขาไฟยุคใหม่ ประมาณยุคเทอร์เชียรีขึ้นมา หรือน้อยกว่า 65 ล้านปี

เพอร์ไลต์จะมีองค์ประกอบหลักทางเคมีคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และไคอะตอมไมท์ ส่วนประกอบทางเคมีของหินเพอร์ไลต์จะอยู่ในรูปของออกไซด์ของธาตุต่าง ๆ ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 2.11 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยของหินเพอร์ไลต์ทั่วโลก กับของประเทศไทย จากการสำรวจของสำนักเหมืองแร่และสัมปทาน เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นทางสถิติ ในการศึกษาเพื่อพัฒนาการใช้เพอร์ไลต์ในงานอุตสาหกรรม (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, 2546)

ตารางที่ 2.11 องค์ประกอบเคมีของหินเพอร์ไลต์ (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)

องค์ประกอบเคมี	ค่าเฉลี่ยหินเพอร์ไลต์	
	ทั่วโลก	ประเทศไทย
SiO ₂	71.0 - 75.0	71.02
Al ₂ O ₃	12.5 - 18.0	16.09
Fe ₂ O ₃	0.50 - 1.50	0.71
FeO	0.00 - 0.10	0.73
MgO	0.10 - 0.50	0.41
CaO	0.50 - 2.00	0.58
Na ₂ O	2.90 - 4.00	0.90
K ₂ O	4.00 - 5.00	5.59
H ₂ O (comb)	3.00 - 5.00	3.57

ตารางที่ 2.12 แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์กับเพอร์ไลต์ (จิตรกร ตั้งอนุสรณ์สุข และคณะ, 2548)

องค์ประกอบเคมี	สัญลักษณ์	ร้อยละโดยน้ำหนักของซีเมนต์	ร้อยละโดยน้ำหนักของเพอร์ไลต์ในประเทศไทย
CaO	C	60 - 67	0.57
SiO ₂	S	17 - 25	71.01
Al ₂ O ₃	A	3 - 8	16.07
Fe ₂ O ₃	F	0.5 - 6.0	0.71
MgO	M	0.1 - 4.0	0.40
Na ₂ O	N	0.1 - 1.8	0.92
K ₂ O	K	0.1 - 1.8	5.57
SO ₃	S	0.5 - 3.0	-
FeO	Fe	-	0.71
H ₂ O (comb)	-	-	3.57
สารประกอบอื่นๆ	-	0.5 - 3.0	-

ต่อมา จิตรกร ดังอนุสรณ์สุข และคณะ (2548) ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเพอร์ไลต์ในประเทศไทย โดยใช้วิธี X-Ray Fluorescence ในการวิเคราะห์ แล้วนำองค์ประกอบดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังตารางที่ 2.12 เพื่อจะทำการศึกษาคูสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของเพอร์ไลต์และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้เป็นข้อมูลคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุทั้ง 2 ชนิด ที่สำคัญให้สามารถใช้เป็นวัตถุดิบที่สามารถนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้างได้ เช่น นำมาใช้ในการทำคอนกรีตมวลเบาที่ทำเป็นคอนกรีตฉนวน เป็นต้น

2.5.3 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของหินเพอร์ไลต์

หินเพอร์ไลต์ส่วนใหญ่เนื้อหินมีลักษณะเป็นแก้ว มักจะมีรอยแตกเป็นวง ๆ ซ้อนกัน คล้ายกลีบหว่าม รอยแตกนี้อาจจะมองเห็นด้วยตา หรืออาจจะต้องอาศัยคูด้วยแว่นขยายหรือใช้กล้องจุลทรรศน์ โดยทั่วไปจะมีสีเทาอ่อนแต่อาจจะพบสีดำ สีน้ำตาล หรือสีเขียวได้ และในเนื้อหินมักจะมีผลึกแร่ควอทซ์ แร่เฟลด์สปาร์ แร่ไบโอไทต์ แร่ฮอร์เนเบลนด์ และมีชิ้นส่วนของเศษหินชนิดอื่นฝังตัวอยู่ มีความแข็งตามมาตรฐานของโมห์ (Moh's scale) ระหว่าง 5.5 ถึง 7.0 ค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 2.3 ถึง 2.8 จุดหลอมตัวระหว่าง 760 ถึง 1,300 องศาเซลเซียส และมีค่าดัชนีการหักเหแสงอยู่ระหว่าง 1.490 ถึง 1.610

2.5.4 การใช้ประโยชน์

เพอร์ไลต์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมี ส่วนใหญ่นำไปใช้ในงานก่อสร้าง เพื่อลดน้ำหนักของสิ่งก่อสร้าง ช่วยเป็นฉนวนกันความร้อนและความเย็น และยังสามารถเป็นผนังป้องกันเสียงได้ นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ ตลอดจนงานทางด้านเกษตร และงานด้านอุตสาหกรรมอื่น ๆ อีกด้วย เช่น

ด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้าง

มีการนำเพอร์ไลต์มาใช้ในการด้านอุตสาหกรรมก่อสร้างประมาณ 70% ของปริมาณที่ผลิตได้ทั่วโลก เนื่องจากมีคุณสมบัติ คือ มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ มีความพรุนสูง ทนไฟ และมีความแข็งแรง ด้วยคุณสมบัติเด่นดังกล่าว เพอร์ไลต์จึงนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น ฝ้าเพดาน เนื่องจากเพอร์ไลต์เป็นส่วนประกอบของฝ้าเพดาน และผลิตภัณฑ์ยิปซัมแผ่นเรียบบางชนิด เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสมที่ทำให้กระเบื้องไม่เป็นตัวนำความร้อน คลื่นเสียงผ่านทะลุไม่ได้ มีความหนาแน่นต่ำ และเป็นวัสดุทนไฟ เมื่อนำไปผสมกับปูนซีเมนต์ จะทำให้ได้คุณภาพที่ดีกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา เมื่อนำไปฉาบผนังตึกหรือเพดานจะทำให้ปูนสามารถยึดติดผนังได้ดี แข็งเร็ว และไม่เกิดรอยร้าว เนื่องจากมีความยืดหยุ่นได้ดี และยังเป็นฉนวนป้องกันความร้อนอีกด้วย

นอกจากนี้เมื่อนำเพอร์ไลต์ไปผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในการทำคอนกรีตใช้ในงานก่อสร้างต่าง ๆ จะทำให้ลดน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างนั้นลงได้ และยังทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อน และป้องกันการสะท้อนของเสียงได้เป็นอย่างดี คอนกรีตที่ใช้เพอร์ไลต์ผสมจะมีความหนาแน่นต่ำถึง 320 kg/m^3 และถ้ามีความหนาแน่นประมาณ 2 นิ้ว จะมีประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนได้เท่ากับแผ่นฉนวนมาตรฐาน แต่มีความแข็งแรงและคงทนกว่าแผ่นฉนวนมาตรฐานมาก ซึ่งได้มีการทดลองและเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยเพอร์ไลต์กับปูนซีเมนต์ผสมแบบธรรมดา โดยบริษัทผลิตเพอร์ไลต์ของประเทศไทยนี้ ดังแสดงในตารางที่ 2.13 (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)

ตารางที่ 2.13 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยเพอร์ไลต์กับปูนซีเมนต์ผสมแบบธรรมดา (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)

	Air Dry Unit Volume Weight (kg/l)	Thermal Conductivity (Kcal/mh °C)
คอนกรีตผสมเพอร์ไลต์	1.20 - 1.60	0.27 - 0.36
ปูนผสมทราย	2.01	1.24

เป็นฉนวน

ห้องที่ต้องการรักษาอุณหภูมิทั้งความเย็นหรือความร้อนเป็นพิเศษ ได้มีการใช้เพอร์ไลต์ อัดเข้าไปในช่องว่างระหว่างผนังของห้อง ซึ่งมักจะใช้เพอร์ไลต์ที่มีความหนาแน่นที่น้อยกว่า 64 kg/m^3 เช่น ห้องเก็บเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่ต้องการอุณหภูมิภายในห้องต่ำ

เป็นเครื่องกรอง

เนื่องจากเพอร์ไลต์มีปริมาณออกไซด์ของธาตุซิลิกาสูง อาจมีมากกว่าร้อยละ 70 มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซึมที่ดี และยังเป็นสารเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมีในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงสามารถนำเพอร์ไลต์ไปใช้เป็นตัวกรองและตัวดูดซึมที่ดี

ด้านอื่น ๆ

นอกจากที่กล่าวมาแล้ว เพอร์ไลต์ยังสามารถนำไปใช้ผสมกับสีทาได้ทั้งภายในและภายนอกของอาคารบ้านเรือน และมีการนำเพอร์ไลต์ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ใช้เป็นผงขัด และผสมซีเมนต์ใช้ในการฉาบผนังปูนน้ำมัน

2.5.5 แหล่งเพอร์ไลต์ในประเทศไทย

แหล่งเพอร์ไลต์พบอยู่ในบริเวณกลุ่มหินภูเขาไฟตอนกลางของประเทศ ซึ่งจัดอยู่ในหน่วยหินภูเขาไฟล้านรายณ์ (นิคม จิงอยู่สุข และปัญญา สุริยะฉาย, 2530) กลุ่มพื้นที่ประมาณ 1,200 ตารางกิโลเมตร อยู่ในเขตจังหวัดลพบุรี และจังหวัดเพชรบูรณ์ หน่วยหินภูเขาไฟล้านรายณ์ประกอบด้วยหินภูเขาไฟชนิดต่าง ๆ ตั้งแต่ บะซอลต์ แอนดีไซต์ ไปจนถึงไรโอไลต์

เพอร์ไลต์เกิดร่วมกับไรโอไลต์ และหินเถ้าถ่านภูเขาไฟ (ash-flow tuffs) โดยเกิดลักษณะแบบลาวา และเกิดแบบพ่นัง โผล่ให้เห็นเป็นชั้นหนาตามบริเวณของภูเขาไฟล้านรายณ์ โดยเฉพาะขอบด้านตะวันตก เพอร์ไลต์ที่พบมีสีดำ น้ำตาล เขียวเข้ม หรือเขียวอ่อน มีลักษณะเนื้อเป็นแก้ว และมีผลึกของเฟลด์สปาร์ประมาณ 2 ถึง 10% และผลึกของไบโอไทต์ประมาณ 1 ถึง 2% ชั้นของเพอร์ไลต์ที่โผล่มีความหนาดังแต่ 1 ถึง 20 m วางตัวค่อนข้างราบ และส่วนมากจะวางตัวอยู่บนหินเถ้าถ่านภูเขาไฟ และถูกปิดทับด้วยไรโอไลต์

2.5.6 สถานการณ์เพอร์ไลต์ของประเทศไทย

ในปัจจุบันเพอร์ไลต์มีการผลิตจากประทานบัตรของ ห้างหุ้นส่วนจำกัดคลองยาง จำนวน 1 แปลง เพียงแหล่งเดียว ตั้งอยู่ที่ตำบลมหาโพธิ์ อำเภอสระโบสถ์ จังหวัดลพบุรี มีอัตราการผลิตประมาณ 2,400 ตันต่อปี สำหรับแร่เกรดสูงที่เหมาะสำหรับทำวัสดุกรองคุณภาพสูงจะถูกจำหน่ายให้กับโรงงานน้ำผลไม้ การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (hydroponic) ตัวเติมสำหรับปูนฉาบสำเร็จ และอิฐทนไฟ โดยจำหน่ายให้กับโรงเผาที่จังหวัดราชบุรี ราคาของเพอร์ไลต์คุณภาพสูงก่อนการเผา 650 บาทต่อตัน เมื่อเผาแล้วราคาจะเพิ่มขึ้นเป็น 6,000 ถึง 12,000 บาทต่อตัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ ความขาว และความหนาแน่น (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)

ประพัตร์ กรังพานิชย์ (2540) ได้ศึกษาถึงการนำกากแร่สังกะสีและวัสดุพูนเบามาเพอร์ไลต์ มาผลิตเป็นคอนกรีตมวลเบา โดยนำกากแร่สังกะสีใช้เป็นวัสดุผสมแทนทรายและเพอร์ไลต์เพื่อลดน้ำหนักของคอนกรีต และยังสามารถศึกษาถึงองค์ประกอบและคุณสมบัติของเพอร์ไลต์ในด้านต่าง ๆ เช่น องค์ประกอบหลักทางเคมีของเพอร์ไลต์ โดยวิธี X-Ray Fluorescence ซึ่งพบว่าองค์ประกอบหลักของเพอร์ไลต์ที่มีปริมาณสูง ได้แก่ SiO_2 ซึ่งพบในปริมาณ 70.29% ส่วน Al_2O_3 และ K_2O พบในปริมาณ 13.64 และ 5.73% ตามลำดับ ด้านองค์ประกอบรอง (trace element) ที่พบในปริมาณไม่มากนัก ได้แก่ P_2O_5 , MgO , CaO และยังสามารถศึกษาถึงความหนาแน่นรวม (bulk density) โดยนำเพอร์ไลต์มาบดแล้วคัดขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐาน เพื่อหาขนาดของเพอร์ไลต์ที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นมวลรวมผสมคอนกรีต ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ขนาด 0.850 mm มีความเหมาะสมในการใช้งาน และค่าความหนาแน่นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่มีการใช้โดยทั่วไป คือ 40 ถึง 300 kg/m^3

คม บัวคลี และรังสรรค์ รังสิมาวงศ์ (2540) ได้ทำการศึกษาเพื่อหาสัดส่วนการผสมมอร์ตาร์มวลเบาโดยใช้เพอร์ไลต์มาแทนที่ทรายบางส่วน เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการและสามารถนำมอร์ตาร์มวลเบาไปใช้งานได้จริงในการผลิตผนังมวลเบา โดยในการทดลองได้ใช้ทั้งขนาดหยาบและขนาดละเอียดปนกัน เพอร์ไลต์ในการทดสอบมีหน่วยน้ำหนักประมาณ 252 kg/m^3 การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์นั้น แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ การทดสอบหน่วยน้ำหนัก การทดสอบความสามารถเทได้โดยใช้โต๊ะการไหล และการทดสอบกำลังอัด โดยกำหนดเป้าหมาย คือ ด้านหน่วยน้ำหนักไม่เกิน 800 kg/m^3 ค่าการไหลแผ่ควรมากกว่า 70% และกำลังอัดควรมีมากกว่า 35 ksc ที่อายุ 7 วัน ผลการวิจัยพบว่าหน่วยน้ำหนักจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเพอร์ไลต์ที่ใช้แทนที่ทรายและปริมาณช่องว่างอากาศที่แทรกในเนื้อมอร์ตาร์ โดยปริมาณเพอร์ไลต์ที่เหมาะสมที่สุดคือแทนที่ทราย 90% โดยปริมาตร ด้านการไหลขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในเพอร์ไลต์เป็นหลัก กล่าวคือ การไหลจะดีเมื่อปริมาณความชื้นในเพอร์ไลต์อยู่ระหว่าง 90 ถึง 100% ส่วนด้านกำลังอัดพบว่ามอร์ตาร์ที่ใส่ทั้งสารกระจายกักฟองอากาศและสารลดน้ำอย่างมากมีคุณสมบัติตรงตามเป้าหมายคือ ค่ากำลังอัด 37 ksc ที่อายุการบ่ม 7 วัน คุณสมบัติด้านหน่วยน้ำหนักและความสามารถเทได้นั้นขึ้นกับปัจจัยหลายประการ แต่ที่ควรระมัดระวังเป็นพิเศษคือปริมาณความชื้นในเพอร์ไลต์และขนาดของเพอร์ไลต์ที่ใช้ในการผสม

Demirboga, Orung and Gul (2001) กล่าวว่า มีวิธีการมากมายที่ใช้ผลิตคอนกรีตมวลเบา (LWC) หนึ่งในวิธีนั้นคือ การไม่ใช้มวลรวมละเอียด (fine aggregate) ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า “no-fines” ส่วนวิธีอื่นที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบา คือ การใส่สารเคมีผสมเพิ่มเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศภายในคอนกรีต โดยที่รู้จักกันคือ Aerated Concrete, Cellular Concrete or Gas Concrete วิธีที่ได้รับความนิยมในการผลิต LWC คือ การใช้ส่วนผสมมวลเบาจากธรรมชาติหรือจากการผลิต ซึ่งสามารถหาได้ และสามารถใช้ผลิตคอนกรีตให้มีความเหมาะสมในการใช้งานได้ทั้งหน่วยน้ำหนักและความแข็งแรง อิฐมวลเบา (LWC blocks) ได้ถูกกำหนดให้ต้องมีกำลังอัดอย่างน้อยที่สุด ประมาณ 36 ksc หน่วยน้ำหนัก $1,680 \text{ kg/m}^3$ โดยมาก LWC blocks ใช้สำหรับทำผนัง เป็นฉนวนกันความร้อนของหลังคาและพื้นของอาคาร

จากข้อมูลของ Demirboga, Orung and Gul (2001) พบว่าทั่วโลกได้มีการพัฒนาวัสดุซีเมนต์ที่สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีต เช่น ซิลิกาฟูม และเถ้าลอย เป็นต้น ซึ่งซิลิกาฟูมเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตโลหะจำพวก Silicon ส่วนเถ้าลอยได้จากการบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ปริมาณของเถ้าลอยทั่วโลกมีอยู่ประมาณ 600 ล้านตัน แต่มีการนำมาใช้งานคอนกรีตเพียง 10% เท่านั้น และเนื่องจากการพัฒนาทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็ว การใช้พลังงานของประชากรโลกจึงเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้นด้วย จึงทำให้เกิดปัญหามลพิษเป็นพิษทางอากาศและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะนำวัสดุดังกล่าวมาใช้ให้เกิด

ประโยชน์ ซึ่งเถ้าลอยและซิลิกาฟูมสามารถใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตได้ เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน

ความแข็งแรงและคุณสมบัติอื่น ๆ ของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างขนาดเล็ก (microstructure) ซึ่งโครงสร้างขนาดเล็กของคอนกรีตขึ้นอยู่กับ ชนิด ปริมาณ และโครงสร้างของวัสดุผสมอื่น ๆ วัสดุผสมของคอนกรีตรวมทั้งมวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ และ Hydrated Cement Paste ที่ได้จากปฏิกิริยา Hydration or Pozzolanic กับน้ำ โครงสร้างของคอนกรีตส่วนใหญ่จะขึ้นกับอัตราการเกิด ชนิด หรือรูปร่างผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา Hydration และการกระจายตัวของปฏิกิริยา Hydration ใน Cement Paste ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงอัตราการเกิด และผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา Hydration ได้โดยใส่สารผสมเพิ่มประเภทสารเคมีผสมเพิ่ม หรือสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม เป็นต้น

คอนกรีตมวลเบาที่ทำจากการใช้วัสดุมวลรวมเบา มีคุณสมบัติที่เด่นชัดคือ มีน้ำหนักเบา เป็นฉนวนความร้อน ด้านทานการแข็งตัวและการละลายตัวของน้ำ และป้องกันไฟ แต่มีข้อเสียคือ คุณสมบัติเชิงกลต่ำ อย่างไรก็ตามข้อมูลในการศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟูม (SF) และเถ้าลอย (FA) ต่อคุณสมบัติของคอนกรีต และต่อคอนกรีตที่ผสมวัสดุมวลรวมเบายังมีไม่เพียงพอ คุณสมบัติของมวลเบาชนิดอื่นและผลกระทบของซิลิกาฟูม และเถ้าลอย ต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยมวลรวมเบาที่ใช้กันส่วนใหญ่จะเป็น Expanded Clay, Expanded Perlite Aggregate (EPA) และเถ้าลอย ซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,200°C หรือมากกว่า อุณหภูมิที่สูงอาจมีผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลาน ดังนั้นจึงได้ศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลาน ของ EPA และผลกระทบของซิลิกาฟูม และเถ้าลอย ที่มีต่อคอนกรีตมวลเบา (LWAC) โดยใช้ EPA ผสมรวมกับ pumice aggregate (PA)

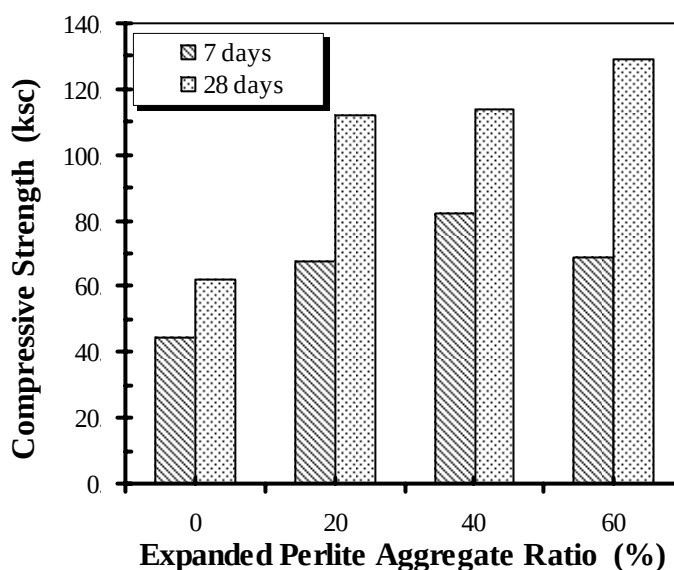
Demirboga, Orung and Gul (2001) จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบของ Expanded Perlite Aggregate (EPA) และสารแร่ธาตุผสมเพิ่มที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ Expanded Perlite แทนที่หินพัมมิช 20, 40 และ 60% โดยเพอร์ไลต์ในการศึกษานี้มีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.14 โดยได้ทำการศึกษาลงถึงผลกระทบด้านกำลังอัดที่ใช้ซิลิกาฟูมและเถ้าลอย Class C แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 และ 30 ใช้สารลดน้ำจำนวนมากร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และควบคุมปริมาณซีเมนต์ที่ 200 kg/m³ ใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาด 100×200 mm ควบคุมค่าชุบตัวที่ 20±5 mm ทำการบ่มในแบบหล่อ 1 วัน และบ่มในน้ำอีก 6 และ 27 วัน แล้วทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 192

ตารางที่ 2.14 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของ Expanded Perlite ประเทศตุรกี (Demirboga, Orung and Gul, 2001)

Component	PC (%)	SF (%)	FA (%)	EPA (%)
SiO ₂	19.8	85-95	30.6	71-75
Al ₂ O ₃	5.61	1.0-3.0	14.8	-
Fe ₂ O ₃	3.42	0.5-1.0	5.5	12-16
CaO	62.97	0.8-1.2	36.8	0.2-0.5
MgO	1.81	1.0-2.0	2.5	-
SO ₃	2.36	-	4.9	-
C	-	0.5-1.0	-	-
K ₂ O	-	-	-	-
Na ₂ O	-	-	-	2.9-4
TiO ₂	-	-	-	-
LOI	0.36	0.5-1.0	2.4	-

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของ EPA ของประเทศตุรกี ที่ Demirboga and Orung ทำการศึกษานั้น พบว่ามีปริมาณสารประกอบหลัก SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เมื่อรวมกันแล้วมีค่ามากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติในการเป็นวัสดุพอลิเมอร์

เมื่อเพิ่มปริมาณ Expanded Perlite ความหนาแน่นของตัวอย่างทั้งหมดลดลงจาก 1,150 เหลือ 753 kg/m³ ทั้งส่วนผสมที่ใช้ซิลิกาฟูมและเถ้าลอย และค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ไม่มีซิลิกาฟูมหรือเถ้าลอย ในส่วนผสม และใช้ Expanded Perlite แทนที่หินพัมมิช 20, 40 และ 60% มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น 52, 85 และ 55% ที่อายุการบ่ม 7 วัน และมีค่าเพิ่มขึ้น 80, 84 และ 108% ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ Expanded Perlite แทนที่หินพัมมิชในปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบานี้เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เนื่องจากหินพัมมิชมีลักษณะค่อนข้างเปราะ และโพรงอากาศภายในเนื้อของหินพัมมิช มีการกระจายตัวไม่ดีเท่าที่ควร เมื่อเปรียบเทียบกับเพอร์ไลต์ที่มีขนาดเล็กจึงทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีกว่า แต่วัสดุทั้งสองมีคุณสมบัติเหมือนกัน คือ มีน้ำหนักเบา และมีความพรุนสูง



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Expanded Perlite กับค่ากำลังอัด
(Demirboga, Orung and Gul, 2001)

ส่วนการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่มีซิลิกาฟูมอยู่ในส่วนผสม 10 ถึง 20% มีปริมาณการแทนที่ Expanded Perlite ที่ 10, 20 และ 40 % ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน มีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ 60% ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ 20% จะทำให้ค่ากำลังอัดลดลง เนื่องจากปริมาณการแทนที่เพอร์ไลต์ที่มากเกินไปทำให้ปริมาณน้ำในการทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอเพราะเพอร์ไลต์มีค่าการดูดซึมน้ำที่สูง อีกทั้งในการเพิ่มปริมาณซิลิกาฟูมที่มากเกินไปก็ทำให้ความต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วยเพราะซิลิกาฟูมมีความละเอียดมากจึงมีพื้นที่ผิวที่ต้องการน้ำมากเช่นกัน และลักษณะการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะคล้ายกับการเกิดปฏิกิริยาทั่วไป คือเมื่อมีซิลิกาฟูมในส่วนผสมคอนกรีตเบา จะส่งผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน มีค่าลดลงแต่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น

ต่อมาในปี ค.ศ. 2003 Demirboga and Gul ยังได้นำเสนอถึงผลกระทบของสารผสมเพิ่มต่อคุณสมบัติด้านการนำความร้อนของคอนกรีตที่ใช้ Perlite ในส่วนผสม เนื่องจากในงานคอนกรีตส่วนใหญ่จะให้ความสำคัญในเรื่องของผลกระทบของสารผสมเพิ่มและกำลังของคอนกรีตเท่านั้น จึงให้ความสำคัญในการศึกษานี้ว่า พฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิก็มีความสำคัญต่อคอนกรีตเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องความสัมพันธ์ของคอนกรีตที่ต้องออกแบบให้มีการนำความร้อนที่ต่ำ ซึ่งการนำความร้อนของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำมีค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ถึง 5 เท่า ของอากาศ และเป็นที่แน่นอนว่าเมื่อมีความชื้นหรือน้ำเข้าไปแทนที่ช่องว่างอากาศในคอนกรีตจะส่งผลให้การนำความร้อนเพิ่มมากขึ้น และ

Demirboga (2003) ยังได้นำเสนอรายงานวิจัยของ Steiger and Hurd ที่ได้รายงานว่า ถ้าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเนื่องจากการดูดซึม 1% จะส่งผลให้การนำความร้อนเพิ่มขึ้น 5%

การนำความร้อนนอกจากจะขึ้นอยู่กับช่องว่าง และปริมาณความชื้นแล้วยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการนำความร้อนของมวลรวมอีกด้วย Demirboga จึงได้ลองทำการศึกษาค้นคว้าโดยใช้อัตราส่วนผสมเดิม คือใช้ Expanded Perlite แทนที่หินพัมมิช 20, 40 และ 60% ใช้ซิลิกาฟูม และเถ้าลอย Class C แทนที่ปูนซีเมนต์ 10, 20 และ 30% ใช้สารลดน้ำจำนวนมาก 1.5% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมปริมาณซีเมนต์ที่ 200 kg/m^3 ทดสอบโดยใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาด $100 \times 200 \text{ mm}$ ควบคุมค่ายุบตัวที่ $20 \pm 5 \text{ mm}$ ทำการบ่มในแบบหล่อ 1 วัน และบ่มในน้ำต่อ 6 และ 27 วัน แล้วทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 192 ส่วนเพอร์ไลต์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นเพอร์ไลต์จากแหล่งเดิมที่มีองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.14

จากการทดสอบตัวอย่างทดสอบการนำความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 2.15 โดยใช้เครื่องทดสอบ QTM 500 device ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Kyoto Electronics Manufacturing Co.,Ltd., ประเทศญี่ปุ่น ที่มีช่วงการวัด 0.0116 ถึง $6 \text{ W/mK} \pm 5\%$ สามารถควบคุมความร้อนอยู่ในช่วงระหว่าง 100 ถึง $1,000^\circ\text{C}$ ทดสอบกับก้อนตัวอย่างที่มีขนาด $100\text{W} \times 80\text{L} \times 40 \text{ mm}$ ใช้เวลาในการให้ความร้อน 100 ถึง 120 วินาที

ตารางที่ 2.15 ค่าการนำความร้อนและค่าความหนาแน่น (Demirboga and Gul, 2003)

EPAC groups	Content	Silica Fume (%)			Fly Ash (%)		
	0	10	20	30	10	20	30
Thermal conductivity (W/mK)	0.1797	0.1720	0.1552	0.1558	0.1676	0.1643	0.1472
Reduction (-) or increment (+) (%)	0	-4	-14	-13	-7	-9	-18
Density (kg/m^3)	522	509	493	485	511	498	483

จากการทดสอบพบว่าคอนกรีตมวลเบาผสม Expanded Perlite ที่มีซิลิกาฟูม หรือเถ้าลอยในส่วนผสม ทำให้ค่าการนำความร้อนลดลง เป็นเหตุผลเนื่องมาจากความหนาแน่นของตัวอย่างที่ลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณการแทนที่ของซิลิกาฟูม และเถ้าลอย โดยเมื่อใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ 10, 20 และ 30% ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนลดลง 4, 14 และ 13% และในทำนองเดียวกันเมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ 10, 20 และ 30% ค่าการนำความร้อนลดลง 7, 9 และ

18% ของตัวอย่างควบคุม ตามลำดับ และในการแทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่การแทนที่ 10 และ 30% ทำให้ค่าการนำความร้อนลดลงได้มากกว่าการแทนที่ด้วย Silica Fume และยังพบอีกว่าค่าการนำความร้อนยังขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของคอนกรีตอีกด้วย กล่าวคือ เมื่อความหนาแน่นของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นด้วย

จากข้อมูลผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่มี Expanded Perlite ในส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 2.16 พบว่าคอนกรีตที่มีซิลิกาฟูม แทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง 12, 19 และ 29% ที่อายุการบ่ม 7 วัน และค่ากำลังอัดเพิ่มสูงขึ้น 9, 13 และ 4% ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ และค่าการนำความร้อนก็เพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของ Silica Fume ที่สามารถทำให้ช่องว่างเล็ก ๆ ของคอนกรีตลดลง (filler effect) เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น ส่วนคอนกรีตมวลเบาผสม Expanded Perlite และมีเถ้าลอย แทนที่ปูนซีเมนต์ 10% ค่ากำลังอัดลดลงที่อายุการบ่ม 7 วัน แต่ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และค่าการนำความร้อนก็เพิ่มสูงขึ้นด้วย ส่วนที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ 20 และ 30% ทั้งที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน ค่ากำลังอัดมีค่าลดลง และค่าการนำความร้อนลดลง ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากเถ้าลอยต้องการระยะเวลาในการบ่มเพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่นานกว่า (long curing period) ของซิลิกาฟูม

ตารางที่ 2.16 ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน (Demirboga and Gul, 2003)

EPAC groups	Content	Silica Fume (%)			Fly Ash (%)		
	0	10	20	30	10	20	30
7-Days compressive strength (ksc)	28.13	24.87	22.83	19.98	21.10	19.88	18.04
Reduction (-) or increment (+) (%)	0	-12	-19	-29	-25	-29	-36
28-Days compressive strength (ksc)	44.24	48.32	49.95	45.87	45.06	37.41	32.21
Reduction (-) or increment (+) (%)	0	+9	+13	+4	+2	-15	-27

จากงานวิจัยของ Demirboga (2003) ทำให้สามารถสรุปได้ว่า คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเพอร์ไลต์สามารถทำให้การนำความร้อนลดลง การนำความร้อนขึ้นอยู่กับปริมาณช่องว่าง ปริมาณความชื้น และความสามารถในการนำความร้อนของมวลรวม ซึ่งความหนาแน่นของคอนกรีตที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นด้วย

Topcu and Isikdag (2007) ได้ตระหนักถึงประโยชน์ของ Expand Perlite Aggregate (EPA) ว่าเป็นได้ทั้งฉนวนกันความร้อนและเสียง และยังเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่าจะ

สามารถทำให้ประหยัดค่าก่อสร้างได้ และ Topcu ได้กล่าวถึงการศึกษาของ Gunning (1994) ที่ได้รายงานไว้ว่า Perlite สามารถเผาให้ขยายตัวได้ 15 ถึง 20 เท่า เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1,100°C และ Topcu ยังได้กล่าวถึงการก่อสร้างอาคารสูงที่ได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหว (earth quake) ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นผลกระทบเนื่องจากคอนกรีตมีหน่วยน้ำหนักมาก และจากการศึกษาของ Topcu ในรายงานวิจัยของ Durmus (1985) พบว่าการใช้ Expanded Perlite ในคอนกรีต เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถลดความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหวได้เนื่องจากมีความเบา

ในการใช้ Expanded Perlite ในคอนกรีต สามารถทำได้โดยการแทนที่ส่วนผสมละเอียด การแปรผันปริมาณการแทนที่จะขึ้นอยู่กับความต้องการกำลังอัด และเมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีในการผลิตปูนซีเมนต์ เพอร์ไลต์สามารถเผาและบดให้ละเอียดได้ง่ายกว่าปูนซีเมนต์ โดย Perlite จะถูกเผาเพื่อให้เกิดการขยายตัวที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1,100°C ในขณะที่ Portland Cement เผาที่อุณหภูมิ 1,400 ถึง 1,500°C ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่าเพอร์ไลต์ใช้พลังงานในการผลิตที่น้อยกว่า ถึงแม้ว่าในการเพิ่ม Expanded Perlite ในส่วนผสมของคอนกรีตจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงในช่วงอายุต้น แต่กำลังของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ Expanded Perlite ก็สามารถพัฒนา กำลังอัดให้เพิ่มสูงขึ้นได้คล้ายคลึงกับปอซโซลานทั่วไป เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น และยังมีข้อได้เปรียบคือ มีหน่วยน้ำหนักที่เบากว่า อีกทั้งยังมีความต้านทานต่อการ แช่แข็ง-ละลายตัว (freezing-thawing) ของโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาพอากาศหนาวหรือในห้องเย็นได้ดีอีกด้วย

ในปี ค.ศ.2007 Topcu and Isikdag จึงได้ทำการศึกษาคูสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ Expanded Perlite เป็นมวลรวมในส่วนผสม ปริมาณออกไซด์หลักของ Expanded Perlite ที่ใช้ในการศึกษา มีส่วนประกอบของ SiO_2 ประมาณ 70 ถึง 75% และมี Al_2O_3 ประมาณ 12 ถึง 16% ใช้ปูนซีเมนต์ 2 ชนิด คือ CEM II 32.5R และ CEM I 42.5R ควบคุมปริมาณซีเมนต์ที่ 300, 350 และ 400 kg/m^3 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย EPA ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ 0, 15, 30, 45 และ 60% ทำการทดสอบพฤติกรรมทั้งคอนกรีตที่อยู่ในสภาพคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว หล่อแท่งตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 150×150×150 mm และทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 mm สูง 300 mm ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.5 ใช้หินที่มีขนาดโตสุด 3.15 mm ปริมาณทรายและ หินในส่วนผสมคงที่เท่ากับ 2,600 และ 2,700 kg/m^3 ตามลำดับ ทำการบ่มตัวอย่างในน้ำที่อายุการบ่ม 28 วัน อุณหภูมิในการบ่ม $23\pm1^\circ\text{C}$ หลังจากนั้นทำการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงอัดและการรับแรงดึงของคอนกรีตที่มี Expanded Perlite ในส่วนผสม เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม

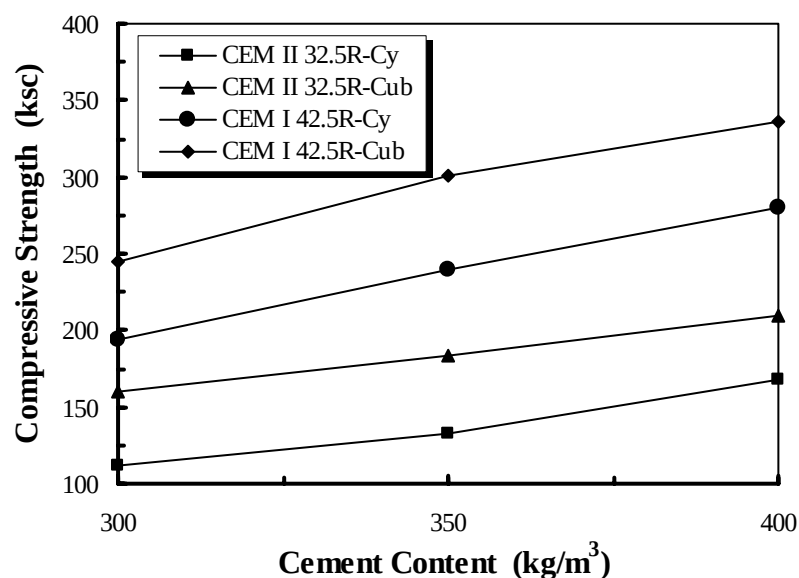
จากการศึกษาพบว่า EPA Concrete มีค่ากำลังอัดและค่ากำลังดึงเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์และคุณภาพของปูนซีเมนต์สูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงปริมาณ คุณภาพ และชนิดของปูนซีเมนต์ เพื่อให้ได้มาซึ่งความสามารถในการทำงานที่ดี แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณและคุณภาพของปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นนั้นส่งผลให้ Vebe Time และหน่วย

น้ำหนักเพิ่มสูงขึ้น ค่าการยุบตัวลดต่ำลง และถึงแม้ว่าการเพิ่มปริมาณ Expanded Perlite จะส่งผลให้กำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตลดต่ำลง แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าในการเพิ่มปริมาณการแทนที่ Expanded Perlite ในอัตราส่วนที่ต่ำ ยังคงสามารถทำให้กำลังของคอนกรีตอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถรับได้ ถ้าไม่คำนึงถึงกำลังของคอนกรีตที่สูญเสียไปบางส่วน

ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตจากการออกแบบส่วนผสม อยู่ระหว่าง 1,800 ถึง 2,400 kg/m^3 โดยที่หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด (fresh concrete) ที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิด CEM II 32.5R ในปริมาณ 350 และ 400 kg/m^3 มีค่าหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น 4.72 และ 8.89% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ชนิดเดียวกันที่ปริมาณ 300 kg/m^3 ตามลำดับ ในขณะที่ EPA Concrete ที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิด CEM I 42.5R ในปริมาณ 350 และ 400 kg/m^3 มีค่าหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นมากกว่า คือมีหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น 4.78 และ 10.87% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ชนิดเดียวกันที่ปริมาณ 300 kg/m^3 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปริมาณและคุณภาพของปูนซีเมนต์ที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย

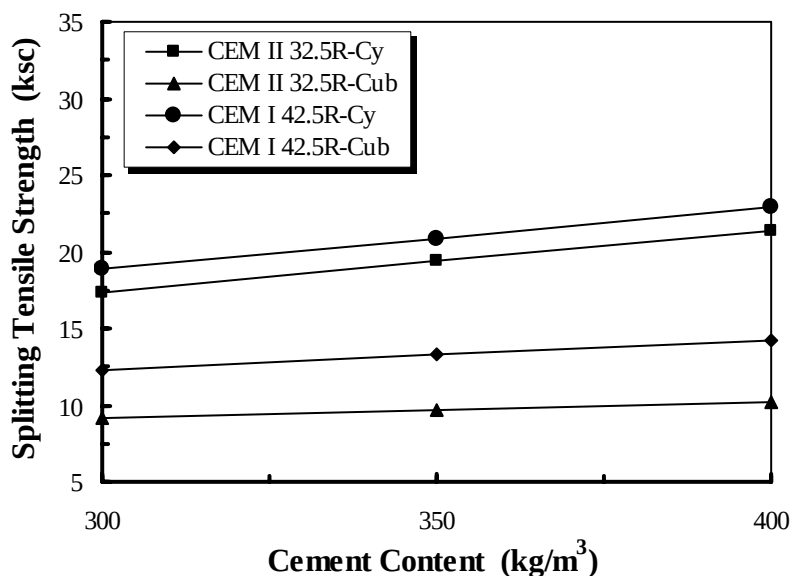
ความสามารถเทได้ของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่สามารถบ่งบอกถึงคุณภาพของคอนกรีต ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่า Vebe Time ของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 3.4 ถึง 3.85 เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ชนิด CEM II 32.5R ที่ปริมาณ 350 และ 400 kg/m^3 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 5.88 และ 8.82% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ชนิดเดียวกันที่ปริมาณ 300 kg/m^3 ตามลำดับ ส่วนในการใช้ปูนซีเมนต์ชนิด CEM I 42.5R ที่ปริมาณ 350 และ 400 kg/m^3 มีค่า Vebe Time เพิ่มขึ้น 5.71 และ 8.57% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ชนิดเดียวกันที่ปริมาณ 300 kg/m^3 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด พบว่า Vebe Time ของ CEM II 32.5R มีค่าน้อยกว่า CEM I 42.5R ประมาณ 2.75% ส่วนการทดสอบการไหลแผ่ (flow table) และค่าการยุบตัว (slump) พบว่าค่าการยุบตัวของ EPA Concrete มีค่าอยู่ระหว่าง 100 ถึง 130 mm ส่วนผสมที่มีหน่วยน้ำหนักต่ำมีค่าการยุบตัวสูงกว่า เนื่องจากภายในเนื้อคอนกรีตมีรูพรุนมากกว่า โดยที่ค่าการยุบตัวที่ใช้ CEM II 32.5R และ CEM I 42.5R ที่ปริมาณ 400 kg/m^3 มีค่าการยุบตัวลดลง 7.69 และ 0.09% ตามลำดับ และมีค่าการไหลแผ่อยู่ที่ 310 และ 360 mm เมื่อเปรียบเทียบกับ EPA Concrete ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ 300 kg/m^3 สรุปได้ว่าค่าการยุบตัวของ EPA concrete ที่ใช้ CEM II 32.5R มีค่าสูงกว่า CEM I 42.5R เนื่องจากมีคุณภาพที่ดีกว่าหรือมีความละเอียดมากกว่า

เมื่อพิจารณาเฉพาะผลการทดสอบค่ากำลังอัดและค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกของ EPA Concrete ที่มีปริมาณ Perlite 30% พบว่ามีค่ากำลังลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่มีปริมาณซีเมนต์เท่ากัน โดยที่ค่ากำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกที่น้อยที่สุดที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 300 kg/m^3 มีค่าเท่ากับ 112.13 และ 9.00 ksc และมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ 400 kg/m^3 มีค่าเท่ากับ 265.04 และ 23.45 ksc ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14



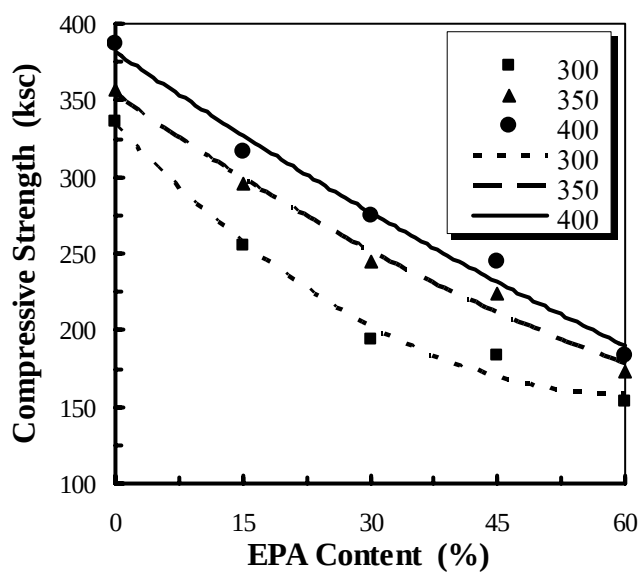
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับปริมาณปูนซีเมนต์ของ EPA Concrete ที่ใช้
Expanded Perlite แทนที่ปูนซีเมนต์ 30% (Topcu and Isikdag, 2007)

ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีปริมาณ EPA 30% มีค่าอยู่ที่ระหว่าง 112.13 และ 336.39 ksc ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของปูนซีเมนต์ รวมทั้งลักษณะรูปร่างของก้อนตัวอย่างด้วย โดยที่ค่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น 20 และ 30% ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 350 และ 400 kg/m³ เมื่อเทียบกับปริมาณปูนซีเมนต์ 300 kg/m³ ตามลำดับ โดยที่แท่งตัวอย่างทรงกระบอก มีค่ากำลังอัดน้อยกว่าแท่งตัวอย่างทรงลูกบาศก์ 30% และค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ที่ 9.17 และ 23.45 ksc ซึ่งเพิ่มขึ้น 13 และ 22% ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 350 และ 400 kg/m³ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณปูนซีเมนต์ที่ 300 kg/m³ ตามลำดับ และยังพบอีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ CEM II 32.5R ให้ค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกที่น้อยกว่า CEM I 42.5R อยู่ 8%

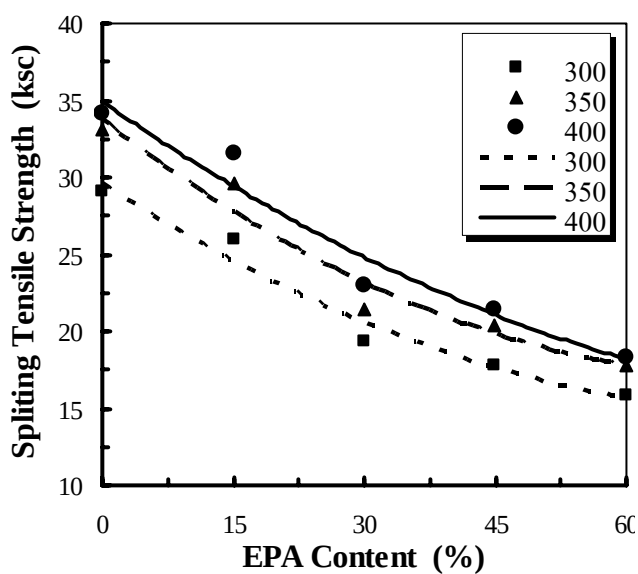


รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกกับปริมาณปูนซีเมนต์ของ EPA Concrete ที่ใช้ Expanded Perlite แทนที่ปูนซีเมนต์ 30% (Topcu and Isikdag, 2007)

EPA concrete ที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิด CEM I 42.5R ที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ 300, 350 และ 400 kg/m³ และใช้เพอร์ไลต์ แทนที่ปูนซีเมนต์ 0, 15, 30, 45 และ 60% ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และ 2.16 พบว่ามีค่ากำลังอัดและค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกต่ำสุด 152.91 และ 15.29 ksc ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 300 kg/m³ และมีค่ามากที่สุด 377.17 และ 35.68 ksc เมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ 400 kg/m³ ตามลำดับ ดังนั้นค่ากำลังอัดที่เหมาะสมสำหรับการผลิต EPA Concrete คือแทนที่ด้วย EPA ที่ปริมาณ 15 และ 30% ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 300 และ 400 kg/m³ ตามลำดับ ส่วนการใช้ EPA ที่ปริมาณ 60% แม้ว่าจะทำให้เกิดผลกระทบในเชิงลบทั้งด้านกำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีก แต่ยังเป็นผลดีในเรื่องคุณสมบัติในการเป็นคอนกรีตมวลเบา



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับปริมาณการแทนที่ Expanded Perlite ที่ใช้
ปูนซีเมนต์ประเภท CEM I 42.5R (Topcu and Isikdag, 2007)



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกกับปริมาณการแทนที่ Expanded Perlite ที่ใช้
ปูนซีเมนต์ประเภท CEM I 42.5R (Topcu and Isikdag, 2007)

จากการพิจารณาผลการวิจัยของ Topcu (2007) สามารถสรุปได้ว่า กำลังของ EPA Concrete ขึ้นอยู่กับคุณภาพของปูนซีเมนต์ ชนิดของปูนซีเมนต์ และเปอร์เซ็นต์การแทนที่ด้วย EPA และในการใช้ EPA ในคอนกรีตจะส่งผลให้ทั้งกำลังดึงและกำลังอัดลดลง แต่จะเกิดผลดีในด้านคุณสมบัติ

ของการเป็นคอนกรีตมวลเบา ยิ่งไปกว่านั้นยังได้คอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักที่น้อยที่สุด โดยใช้ปูนซีเมนต์ชนิด CEM II 32.5R ที่ปริมาณ EPA 30% ส่วนอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานคอนกรีตมวลเบา คือ การใช้ EPA ที่ปริมาณ 15 และ 30% โดยใช้ปูนซีเมนต์ชนิด CEM I 42.5R ในปริมาณ 350 และ 400 kg/m³

ถึงแม้ว่ากำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่สูงขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณและคุณภาพของปูนซีเมนต์ แต่ก็ไม่ได้ทำให้ค่าความสามารถเทได้ดีขึ้น โดยสังเกตจากค่าการทดสอบ Flow Table Test และ Slump Test ที่ลดลง และค่า Vebe Time ที่เพิ่มขึ้น ที่ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากัน แต่ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตจะแปรผันโดยตรงกับการเพิ่มปริมาณและคุณภาพปูนซีเมนต์ และสามารถกล่าวสรุปได้ว่า Expanded Perlite สามารถใช้เป็นส่วนผสมละเอียดได้ แต่ต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่ดี

2.6 สรุปปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปอชโซลาน

การใช้ปอชโซลานในงานคอนกรีตมีข้อดีหลายประการ เช่น เพิ่มความสามารถในการเทได้ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ลดการหดตัว และลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ถึงแม้ว่าอัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น แต่สามารถเพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตมวลเบา

ไคอะตอมไมท์

แหล่งของไคอะตอมไมท์ในประเทศไทยพบมากในจังหวัดลำปาง โดยมีปริมาณสำรองของไคอะตอมไมท์ทั้งหมดประมาณ 245 ล้านตัน

ไคอะตอมไมท์ลำปางทั้งที่ผ่าน และไม่ผ่านกระบวนการเผา สามารถนำมาทำอิฐมวลเบาได้จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตมวลเบาได้เช่นกัน และถึงแม้ว่าไคอะตอมไมท์จะไม่ได้ผ่านกระบวนการเผา แต่ก็ยังมีคุณสมบัติที่ดี คือ มีความเบา และมีรูพรุนสูง และยังมีองค์ประกอบเคมีที่แสดงถึงความเป็นวัสดุปอชโซลานธรรมชาติ ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมทั้งการนำมาใช้เป็นวัสดุผสมมวลรวมเบาในคอนกรีตมวลเบา และใช้เป็นวัสดุปอชโซลานในคอนกรีต

ไคอะตอมไมท์ในแต่ละแหล่งจะมีรูปร่างและปริมาณออกไซด์หลักที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาการทับถม แหล่งกำเนิด และชนิดของไคอะตอม ดังนั้นในการศึกษาควรคำนึงถึงทั้งลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของไคอะตอมไมท์ในแต่ละแหล่งกำเนิด

การเพิ่มปริมาณไคอะตอมไมท์ทำให้มีความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น และทำให้ระยะเวลาการก่อตัวขึ้นต้นและขึ้นปลายสูงขึ้น เนื่องจากไคอะตอมไมท์มีพื้นที่ผิวมากและอนุภาคค่อนข้างละเอียด ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต ดังนั้นจึงควรคำนึงถึงปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด

เพอร์ไลต์

คอนกรีตที่มีเพอร์ไลต์ในส่วนผสม มีความเป็นฉนวนกันความร้อนและเสียง และยังทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบาลง ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่าจะสามารถทำให้ประหยัดค่าก่อสร้างได้ อัตราการผลิตเพอร์ไลต์ ประมาณ 2,400 ตันต่อปี ราคาของเพอร์ไลต์คุณภาพสูงก่อนการเผาที่ 650 บาทต่อตัน เมื่อเผาแล้วราคาจะเพิ่มขึ้นเป็น 6,000 ถึง 12,000 บาทต่อตัน

ปริมาณการแทนที่เพอร์ไลต์ในส่วนผสมที่มากเกินไปจะทำให้ปริมาณน้ำในการทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอเนื่องจากเพอร์ไลต์มีค่าการดูดซึมน้ำที่สูง การใช้เพอร์ไลต์ในคอนกรีตจะส่งผลให้กำลังอัดลดลง แต่ยังคงสามารถทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้ และยังเกิดผลดีในด้านคุณสมบัติของการเป็นคอนกรีตมวลเบา ถ้าไม่คำนึงถึงกำลังของคอนกรีตที่สูญเสียไปบางส่วน แต่ถ้าต้องการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นก็ต้องคำนึงถึง คุณภาพ ชนิด และปริมาณของปูนซีเมนต์อีกด้วย

ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาของเพอร์ไลต์จะคล้ายกับปฏิกิริยาของวัสดุปอซโซลานทั่วไป คือค่ากำลังอัดในช่วงต้นมีค่าลดลง แต่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น

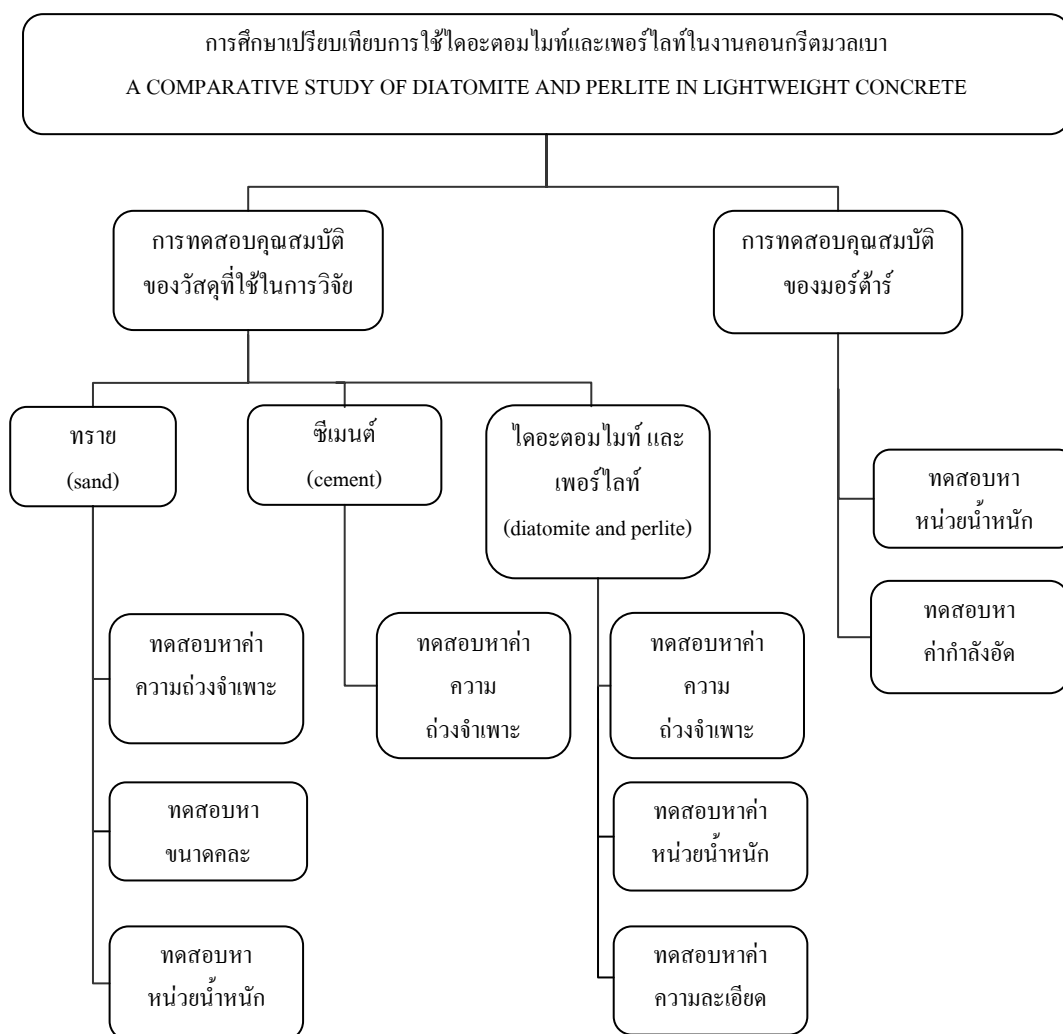
คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเพอร์ไลต์สามารถทำให้การนำความร้อนลดลง การนำความร้อนขึ้นอยู่กับปริมาณช่องว่าง ปริมาณความชื้น และความสามารถในการนำความร้อนของมวลรวม

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษาวิจัยเปรียบเทียบการใช้ไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ในงานคอนกรีตมวลเบา
ทำการแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

- 1) การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย
- 2) การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงการดำเนินงานวิจัย

3.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 การทดสอบคุณสมบัติของทราย

1) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของทราย

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะในสภาพต่าง ๆ ของมวลรวมละเอียดโดยเฉพาะในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (saturated surface dry) และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (absorption) ของมวลรวมละเอียด และนำค่าไปออกแบบส่วนผสมมอร์ตาร์ ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะนี้จะหาค่าได้จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างมวลรวมต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ามวลรวม โดยทั่วไปค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.4 ถึง 3.0 และโดยทั่วไปจะใช้ค่าความถ่วงจำเพาะในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่ดูดซึมน้ำและไม่คายน้ำ ส่วนค่าการดูดซึมน้ำบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซึมน้ำไว้ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 128 (2001) รูปการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของทราย

2) การทดสอบหาขนาดผลของทราย

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาการกระจายตัวและส่วนผลของทราย ส่วนผลของมวลรวมจะมีผลต่อความสามารถเทได้ และแต่ละก้อนของมวลรวมละเอียดจะต้องถูกห่อหุ้มด้วยซีเมนต์เพสต์ไม่ว่ามวลรวมนั้นจะมีขนาดใหญ่หรือเล็กก็ตาม ในการทดสอบใช้วิธีการตะแกรงร่อนให้ได้ตามมาตรฐาน ASTM C 136 (2001) ดังแสดงในรูปที่ 3.3

3) การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของทราย

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อให้สามารถหาค่าหน่วยน้ำหนักของทรายได้ และนำค่าที่ได้มาออกแบบส่วนผสมของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C 29 (2001)



รูปที่ 3.3 การทดสอบการหาขนาดละเอียดของทราย

3.1.2 การทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ ในการวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 3.15 สามารถทดสอบได้ตามมาตรฐาน ASTM C 188 (2001) รูปการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์

3.1.3 การทดสอบคุณสมบัติของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์

1) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์

เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ สามารถวัดได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับทราย ตามมาตรฐาน ASTM C 128 (2001) รูปการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์

2) การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ โดยทำการทดสอบเช่นเดียวกับทราย ตามมาตรฐาน ASTM C 29 (2001) ดังแสดงในรูปที่ 3.5

3) การทดสอบหาค่าความละเอียดของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าความละเอียดของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ โดยวัดจากปริมาณที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 618 (1991)

3.2 การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์

3.2.1 การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนัก

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาหน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์เป็นส่วนผสม แล้วเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างมอร์ต้าร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 7 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C 138 (2001)

3.2.2 การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัดของมอร์ต้าร์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของมอร์ต้าร์ได้เป็นอย่างดี และเพื่อหาค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์เป็นส่วนผสม แล้วเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างมอร์ต้าร์ควบคุม โดยจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109 (2001)

3.2.3 ส่วนผสมและจำนวนของก้อนตัวอย่าง ก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ รวมทั้งสิ้น (ทั้ง perlite และ diatomite) 750 ตัวอย่าง โดยแยกตามลักษณะการผสม ดังนี้

1) ก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม (control mortar)

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมและจำนวนก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม

ลำดับที่	อายุการบ่ม (วัน)	อัตราส่วน (C:S)	อัตราส่วน (C:S) (%)	จำนวนก้อนตัวอย่าง (ก้อน)
1	3	1 : 2.75	100 : 100	3
2	7	1 : 2.75	100 : 100	3
3	14	1 : 2.75	100 : 100	3
4	28	1 : 2.75	100 : 100	3
5	60	1 : 2.75	100 : 100	3
6	90	1 : 2.75	100 : 100	3
			รวม	18

2) ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาโดยแทนที่ทรายด้วยไดอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตมวลเบา

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาโดยแทนที่ทรายด้วยไดอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตมวลเบา

ลำดับที่	อัตราส่วน (C:S:D, P)	อัตราส่วน (C:S:D, P) (%)	จำนวนของก้อนตัวอย่าง ที่อายุการบ่มต่าง ๆ (ก้อน)				จำนวน ก้อน ตัวอย่าง (ก้อน)
			3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	
1	1 : 2.475 : 0.275	100 : 90 : 10	6	6	6	6	24
2	1 : 2.200 : 0.550	100 : 80 : 20	6	6	6	6	24
3	1 : 1.925 : 0.825	100 : 70 : 30	6	6	6	6	24
4	1 : 1.650 : 1.100	100 : 60 : 40	6	6	6	6	24
			รวม				96

3) ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตมวลเบา

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตมวลเบา

ลำดับที่	อัตราส่วน (C:S:D, P)	อัตราส่วน (C:S:D, P) (%)	จำนวนของก้อนตัวอย่าง ที่อายุการบ่มต่าง ๆ (ก้อน)				จำนวน ก้อน ตัวอย่าง (ก้อน)
			3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	
1	0.90 : 2.75 : 0.10	90 : 100 : 10	6	6	6	6	24
2	0.80 : 2.75 : 0.20	80 : 100 : 20	6	6	6	6	24
3	0.70 : 2.75 : 0.30	70 : 100 : 30	6	6	6	6	24
4	0.60 : 2.75 : 0.40	60 : 100 : 40	6	6	6	6	24
			รวม				96

4) ส่วนผสมโดยแทนที่ทรายด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นสาร
ปอซโซลานธรรมชาติ

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมโดยแทนที่ทรายด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นสาร
ปอซโซลานธรรมชาติ

ลำดับที่	อัตราส่วน (C:S:D, P)	อัตราส่วน (C:S:D, P) (%)	จำนวนของก้อนตัวอย่าง ที่อายุการบ่มต่าง ๆ (ก้อน)						จำนวน ก้อน ตัวอย่าง (ก้อน)
			3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	
1	1 : 2.6125 : 0.1375	100 : 95 : 5	6	6	6	6	6	6	36
2	1 : 2.4750 : 0.2750	100 : 90 : 10	6	6	6	6	6	6	36
3	1 : 2.3375 : 0.4125	100 : 80 : 15	6	6	6	6	6	6	36
4	1 : 2.2000 : 0.5500	100 : 80 : 20	6	6	6	6	6	6	36
5	1 : 2.0625 : 0.6875	100 : 75 : 25	6	6	6	6	6	6	36
			รวม						180

5) ส่วนผสมโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้
เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ

ตารางที่ 3.5 ส่วนผสมโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นสาร
ปอชโซลานธรรมชาติ

ลำดับที่	อัตราส่วน (C:S:D, P)	อัตราส่วน (C:S:D, P) (%)	จำนวนของก้อนตัวอย่าง ที่อายุการบ่มต่าง ๆ (ก้อน)						จำนวน ก้อน ตัวอย่าง (ก้อน)
			3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	
1	0.95 : 2.75 : 0.05	95 : 100 : 5	6	6	6	6	6	6	36
2	0.90 : 2.75 : 0.10	90 : 100 : 10	6	6	6	6	6	6	36
3	0.85 : 2.75 : 0.15	85 : 100 : 15	6	6	6	6	6	6	36
4	0.80 : 2.75 : 0.20	80 : 100 : 20	6	6	6	6	6	6	36
5	0.75 : 2.75 : 0.25	75 : 100 : 25	6	6	6	6	6	6	36
			รวม						180

6) ส่วนผสมโดยผสมเพิ่มด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นสาร
ปอชโซลานธรรมชาติ

ตารางที่ 3.6 ส่วนผสมโดยผสมเพิ่มด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นสาร
ปอชโซลานธรรมชาติ

ลำดับที่	อัตราส่วน (C:S:D, P)	อัตราส่วน (C:S:D, P) (%)	จำนวนของก้อนตัวอย่าง ที่อายุการบ่มต่าง ๆ (ก้อน)						จำนวน ก้อน ตัวอย่าง (ก้อน)
			3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	
1	1 : 2.75 : 0.05	100 : 100 : 5	6	6	6	6	6	6	36
2	1 : 2.75 : 0.10	100 : 100 : 10	6	6	6	6	6	6	36
3	1 : 2.75 : 0.15	100 : 100 : 15	6	6	6	6	6	6	36
4	1 : 2.75 : 0.20	100 : 100 : 20	6	6	6	6	6	6	36
5	1 : 2.75 : 0.25	100 : 100 : 25	6	6	6	6	6	6	36
			รวม						180

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาคูณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย และผลการศึกษาคูณสมบัติด้านกำลังอัด และค่าหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ในส่วนผสม โดยใช้เปอร์เซ็นต์การแทนที่หรือเปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน ทั้งที่ใช้เป็นวัสดุผสมมวลรวมเบา และวัสดุแร่ธาตุผสมเพิ่ม โดยใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ Type 1 ในส่วนผสมมอร์ตาร์มวลเบา และใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ Type 2 ในส่วนผสมมอร์ตาร์เพื่อวิเคราะห์ความเป็นวัสดุปอซโซลาน และนำผลการศึกษาเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่มต่าง ๆ

4.1 ลักษณะทางกายภาพของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ Type 1 และ Type 2

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์กับปูนซีเมนต์และทราย ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ Type 1 และ เพอร์ไลท์ Type 2 มีความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักต่ำกว่าปูนซีเมนต์ และทราย โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.62, 0.16 และ 0.29 เท่าของปูนซีเมนต์ และเท่ากับ 0.73, 0.19 และ 0.33 เท่าของทรายตามลำดับ โดยที่ไคอะตอมไมท์มีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยที่สุด และเพอร์ไลท์ Type 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าเพอร์ไลท์ Type 2 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าในการนำสารปอซโซลานธรรมชาติทั้งสามชนิดนี้ไปใช้ในส่วนผสม สามารถทำให้หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ลดลง เนื่องจากเพอร์ไลท์มีน้ำหนักเบา และมีความพรุนสูง

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ Type 1 และ เพอร์ไลท์ Type 2

	Portland Cement Type 1	Sand	Diatomite	Perlite Type 1	Perlite Type 2
Specific Gravity	3.15	2.70	1.96	0.50	0.92
Dry Unit Weight (kg/m ³)	1,450	1,584	530-820	160-205	120-150
Median Particle Size (µm)	11.24	-	7.46	77.68	28.80

จากผลการทดสอบ Laser Particle Size ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าไคอะตอมไมท์ มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย Median Particle Size (d_{50}) เท่ากับ 7.46 micron ซึ่งเล็กกว่าปูนซีเมนต์ที่มีขนาด d_{50} เท่ากับ 11.24 micron อยู่ 0.66 เท่า แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการแทรกเข้าไปในช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นได้ ส่วนเพอร์ไลต์ Type 1 และ เพอร์ไลต์ Type 2 มีขนาดอนุภาค d_{50} เท่ากับ 77.68 และ 28.20 micron ซึ่งใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ 6.91 และ 2.56 เท่า ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการลดน้ำหนักของมอร์ตาร์ลงได้ เนื่องจากมีขนาดที่ใหญ่กว่าแต่มีความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่า

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และ Type 2

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และเพอร์ไลต์ Type 2 ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า

1) ไคอะตอมไมท์ มีปริมาณสารประกอบหลัก $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 93.42\%$ ปริมาณ $\text{SO}_3 = 386 \text{ ppm}$ ค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อน (LOI) 8.11% และมีเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ประมาณ 87.3% ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าไคอะตอมไมท์ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเผาจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ตามระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 (2001) ซึ่งกำหนดให้ปริมาณสารประกอบหลัก $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ต้องมีค่ามากกว่า 70% ค่า LOI ไม่มากกว่า 10% ค่า SO_3 ไม่มากกว่า 4% และเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (ช่องเปิด 45 micron) ไม่น้อยกว่า 66%

2) เพอร์ไลต์ Type 1 มีปริมาณสารประกอบหลัก $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 88.01\%$ ปริมาณ $\text{SO}_3 = 251 \text{ ppm}$ และมีการสูญเสียเนื่องจากความร้อน 1.02%

3) เพอร์ไลต์ Type 2 มีปริมาณสารประกอบหลัก $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 84.63\%$ ปริมาณ $\text{SO}_3 = 358 \text{ ppm}$ ค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อน 1.25% และมีเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ประมาณ 82.5%

เพอร์ไลต์ Type 1 และ Type 2 มีปริมาณสารประกอบหลักใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าเพอร์ไลต์ที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วจัดเป็นวัสดุปอซโซลานได้ทั้ง Class N และ Class F ตามระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 (2001) ซึ่งกำหนดให้ปริมาณสารประกอบหลักดังกล่าวต้องมีค่ามากกว่า 70% และมีค่า LOI ไม่มากกว่า 10 และ 6% ค่า SO_3 ไม่มากกว่า 4% ตามลำดับ และควรมีเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ไม่น้อยกว่า 66%

จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าไคอะตอมไมท์ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเผา และเพอร์ไลต์ทั้งสองชนิดที่ผ่านการเผาแล้ว สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติได้ เนื่องจากมีองค์ประกอบหลักทางเคมีตามมาตรฐานกำหนด

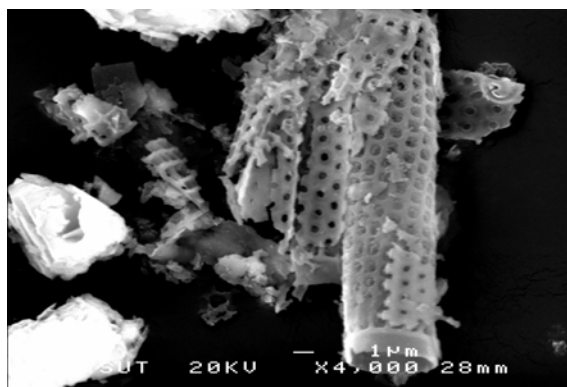
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และ เพอร์ไลต์ Type 2 ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)

Chemical Composition (%)	Portland Cement Type 1*	Diatomite	Perlite Type 1	Perlite Type 2
SiO ₂	17-25	68.27	75.16	71.32
Al ₂ O ₃	3-8	9.93	10.46	10.73
Fe ₂ O ₃	0.5-6.0	15.22	2.39	2.58
CaO	60-67	0.80	1.60	1.86
K ₂ O	0.1-1.8	1.65	9.46	8.35
MgO	0.1-4.0	-	-	-
N ₂ O	0.1-1.8	-	-	-
SO ₃	0.5-3.0	386 ppm	251 ppm	358 ppm
Loss on Ignition (LOI)	0.1-3.0	8.11	1.02	1.25

หมายเหตุ : * ข้อมูลจาก ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัยจตุรพิทักษ์กุล (2547)

4.3 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และ เพอร์ไลต์ Type 2

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และ เพอร์ไลต์ Type 2 โดยทำการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.3

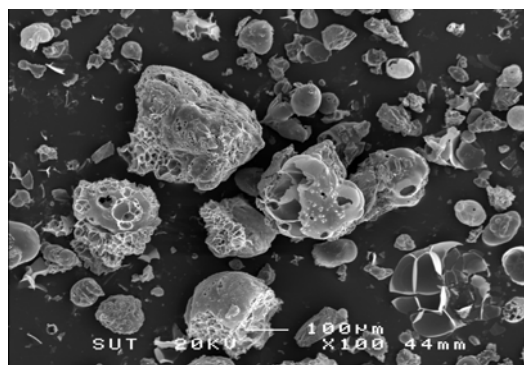


รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของไดอะตอมไมท์

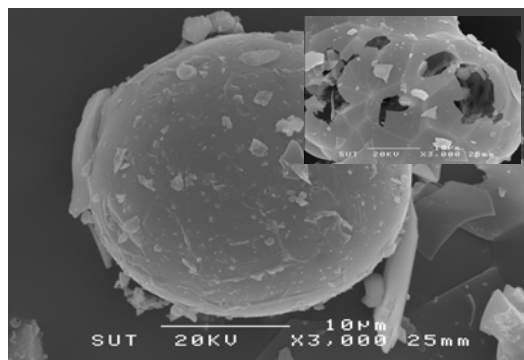
พบว่าไคอะตอมไมท์ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเผาหรืออบค มีลักษณะอนุภาคเป็นแท่งทรงกระบอกกลวง มีผนังลักษณะเป็นโครงข่ายที่ค่อนข้างสมบูรณ์และเป็นระเบียบคล้ายรังผึ้ง มีความพรุนสูง ขนาดอนุภาคประมาณ 5 ถึง 25 micron ดังแสดงในรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าเพอร์ไลต์ Type 1 มีขนาดอนุภาคประมาณ 60 ถึง 300 micron ส่วนเพอร์ไลต์ Type 2 มีขนาดอนุภาคประมาณ 15 ถึง 35 micron จากภาพถ่าย SEM แสดงให้เห็นถึงลักษณะของเพอร์ไลต์ทั้งสองชนิดที่คล้ายกันคือ มีลักษณะอนุภาคแบบกลวงกลม เปราะ มีลักษณะเป็นโครงข่าย บางอนุภาคมีลักษณะคล้ายเปลือกไข่ และมีความพรุนสูงเนื่องจากผ่านกระบวนการเผาเพื่อให้เกิดการขยายตัว

จากลักษณะอนุภาคของ Natural Pozzolan ทั้งสามชนิดดังกล่าว เมื่อนำมาใช้เป็นสารผสมในคอนกรีตจึงสามารถทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักที่ลงเบาได้ แต่เนื่องจากความพรุนที่สูงนี้ทำให้ความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น



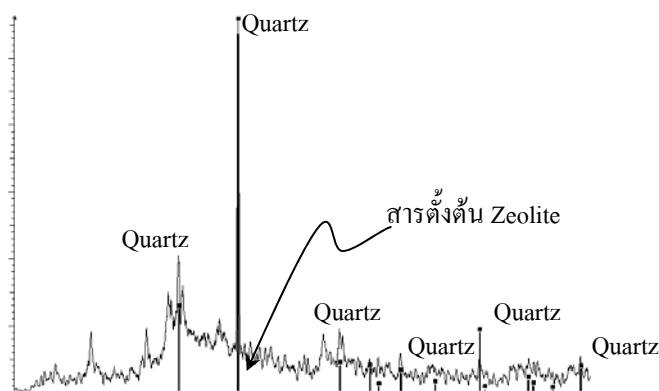
รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของเพอร์ไลต์ Type 1



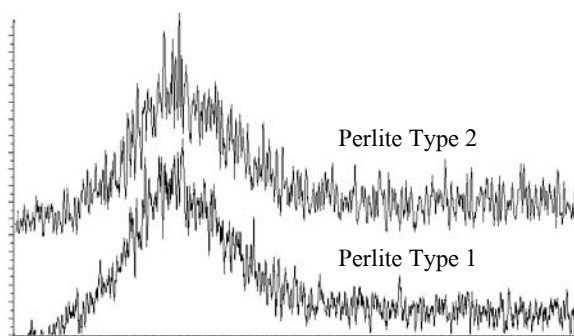
รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของเพอร์ไลต์ Type 2

4.4 ความเป็นผลึกของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และเพอร์ไลต์ Type 2

จากผลการทดสอบความเป็นผลึกของไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์ โดยวิธี X-Ray Diffraction Analysis (XRD) พบว่าเพอร์ไลต์ Type 1 และ Type 2 มีลักษณะคล้ายกันคือ มีลักษณะไม่เป็นผลึกหรือมีรูปร่างอสัณฐาน (glassy phase or amorphous) ส่วน XRD ของไคอะตอมไมท์เมื่อเปรียบเทียบกับสารตั้งต้นที่เป็น Zeolite พบว่าไคอะตอมไมท์มีลักษณะความเป็นผลึก (crystalline) ของ Quartz ปะปนอยู่ แต่แนวโน้มส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นกึ่งอสัณฐาน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ซึ่งความเป็นอสัณฐานนี้สามารถบ่งบอกได้ถึงความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) และเพอร์ไลต์จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าไคอะตอมไมท์ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับผล XRD ของเถ้าแกลบดำ เรื่องความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว ของ บุรฉัตร ฉัตรวิระ และ ทวีศักดิ์ คงทรัพย์ (2545) พบว่ามีลักษณะคล้ายกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ความไม่เป็นผลึกสามารถบ่งบอกถึงแนวโน้มความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบ XRD ของไคอะตอมไมท์



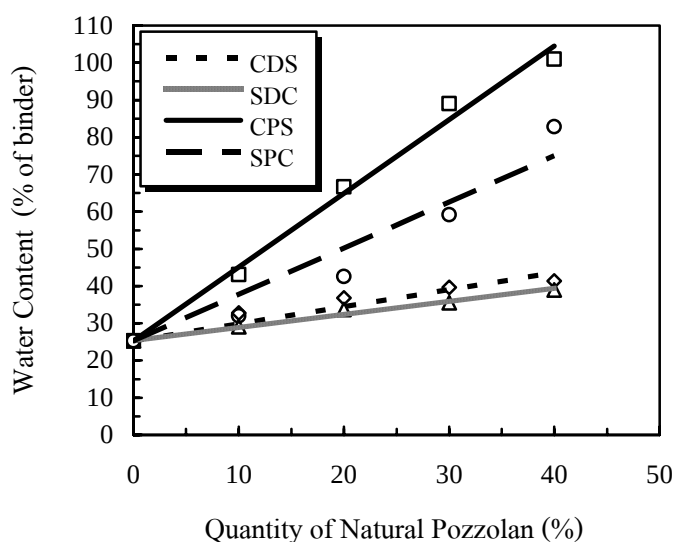
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบ XRD ของเพอร์ไลต์ Type 1 และ เพอร์ไลต์ Type 2

4.5 ผลกระทบต่อปริมาณน้ำ

4.5.1 ผลกระทบต่อปริมาณน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์

Type 1 ในส่วนผสม

ปริมาณการเพิ่มขึ้นทั้งของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเพิ่มปริมาณน้ำ เนื่องจากในการวิจัยนี้มีการควบคุมปริมาณน้ำที่สามารถทำให้คอนกรีตมวลเบามีค่าการไหลแผ่ 105 ถึง 115% ส่วนผสมทั้งที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 โดยการแทนที่ทรายทำให้มีความต้องการปริมาณน้ำมากกว่าการแทนที่ด้วยซีเมนต์ เนื่องจากปริมาณทรายในส่วนผสมมีถึง 2.75 เท่าของปริมาณซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6

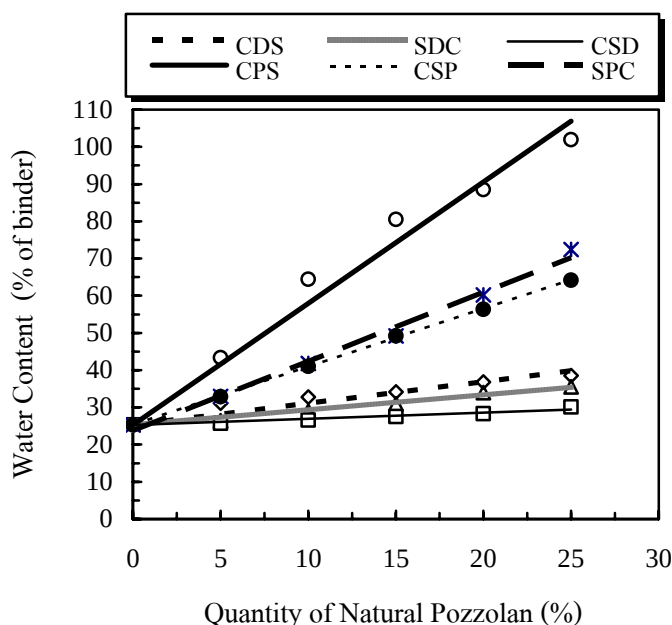


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับปริมาณไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ Type 1 ในคอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ทรายและปูนซีเมนต์จะมีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 20 และ 12.50% ทุกปริมาณการแทนที่ 10% ส่วนการแทนที่ทรายและปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์จะมีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น 4.55 และ 3.75% ทุกปริมาณการแทนที่ 10% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณน้ำของมอร์ต้าร์ควบคุม ตามลำดับ การใช้เพอร์ไลต์ Type 1 ในคอนกรีตมวลเบามีการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมากกว่าการใช้ไคอะตอมไมท์ เนื่องจากเพอร์ไลต์ Type 1 มีความพรุนสูงกว่า และมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า ถึงแม้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำจะส่งผลดีต่อความสามารถเทได้ แต่จะมีผลเสียโดยตรงต่อกำลังอัด เนื่องจากค่าปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (water/binder, W/B) ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดลดลง

4.5.2 ผลกระทบต่อปริมาณน้ำของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ

การใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ ส่งผลกระทบโดยตรงต่อความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมเช่นเดียวกับการใช้ในคอนกรีตมวลเบา เมื่อทำการแทนที่ทราย แทนที่ปูนซีเมนต์ และผสมเพิ่มด้วยไคอะตอมไมท์ ทุก 5% จะส่งผลให้มีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 5.88, 3.88 และ 1.88% แต่การใช้เพอร์ไลต์ Type 2 ในส่วนผสมจะต้องการปริมาณน้ำมากกว่า โดยมีค่าปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นทุกปริมาณการแทนที่ 5% ประมาณ 32.28, 17.88 และ 15.48% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณน้ำของมอร์ตาร์ควบคุมตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ Type 2 เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ

การแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์ Type 2 มีความต้องการน้ำมากกว่าไคอะตอมไมท์ และการแทนที่ทรายมีความต้องการปริมาณน้ำมากที่สุด แม้ว่าไคอะตอมไมท์จะมีอนุภาคเฉลี่ยที่ละเอียดกว่า แต่เพอร์ไลต์ Type 2 มีความพรุนมากกว่า หน่วงน้ำหนักน้อยกว่า และมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า ดังนั้นในการนำไปประยุกต์ใช้ควรคำนึงถึงอัตราส่วน W/B ที่เพิ่มขึ้นด้วย เพราะปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อกำลังอัด ถ้าใช้ไคอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลต์ Type 2 ในส่วนผสมเพื่อเป็นสารปอซโซลานธรรมชาติในปริมาณมากเกินไปจะทำให้ค่ากำลังอัดลดลงตามไปด้วย

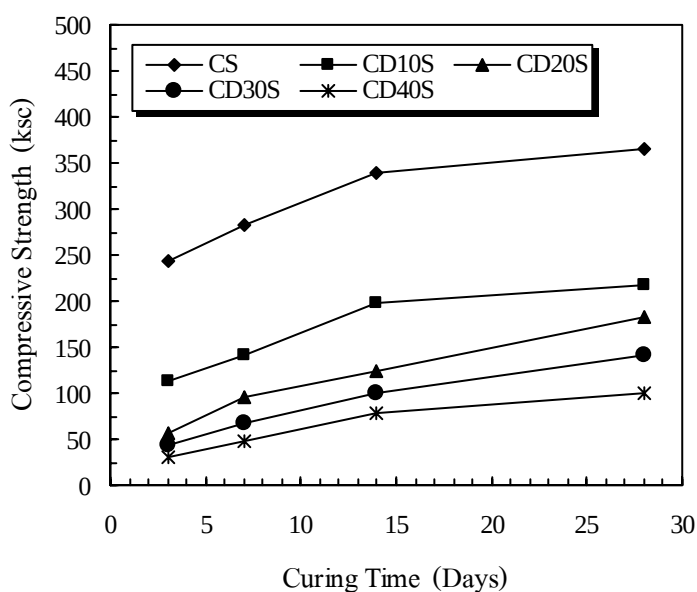
4.6 คุณสมบัติด้านกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสมสามารถแยกวิเคราะห์ได้ ดังนี้

4.6.1 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม

1) กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทราย

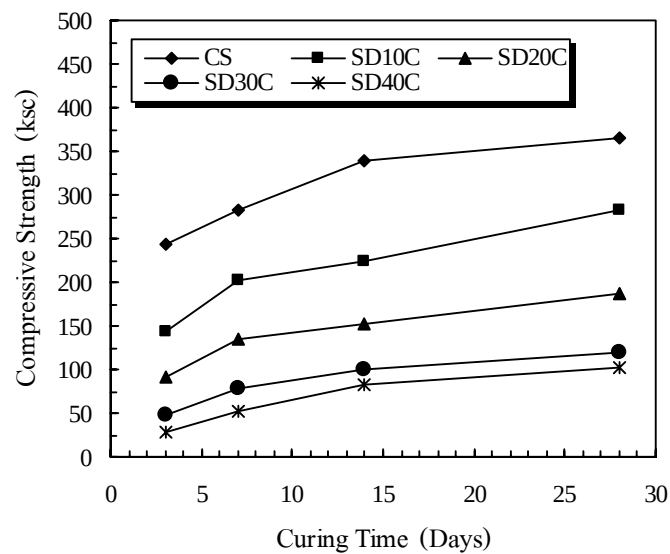
จากรูปที่ 4.8 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทรายมีค่าลดลงตามปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุมตามอายุการบ่ม ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทรายมีค่าสูงที่สุด 218 ksc และมีค่าน้อยที่สุด 100 ksc เมื่อใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทราย 10 และ 40% ซึ่งมีค่าลดลง 40.42 และ 72.58% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 กราฟกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทราย

2) กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์

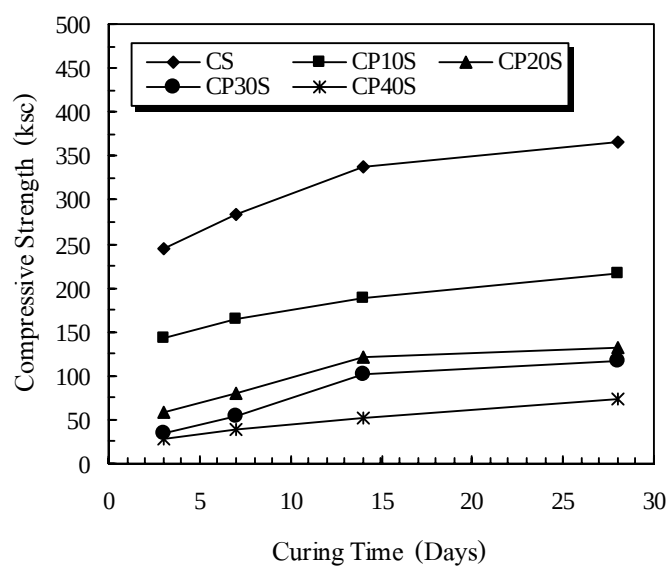
กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์มีลักษณะคล้ายคลึงกับการแทนที่ด้วยทราย โดยมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุมตามอายุการบ่ม ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์มีค่าสูงที่สุด 283 ksc และมีค่าน้อยที่สุด 102 ksc เมื่อใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 10 และ 40% ซึ่งมีค่าลดลง 22.64 และ 72.08% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์

3) กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เฟอร์ไรท์ Type 1 แทนที่ทราย

กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เฟอร์ไรท์ Type 1 แทนที่ทรายมีลักษณะคล้ายคลึงกับการแทนที่ทรายด้วยไคอะตอมไมท์ โดยมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ทรายที่เพิ่มขึ้น แต่มีค่ากำลังอัดที่น้อยกว่าการแทนที่ทรายด้วยไคอะตอมไมท์ แต่อย่างไรก็ตามการพัฒนา กำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุมตามอายุการบ่ม ดังแสดงในรูปที่ 4.10

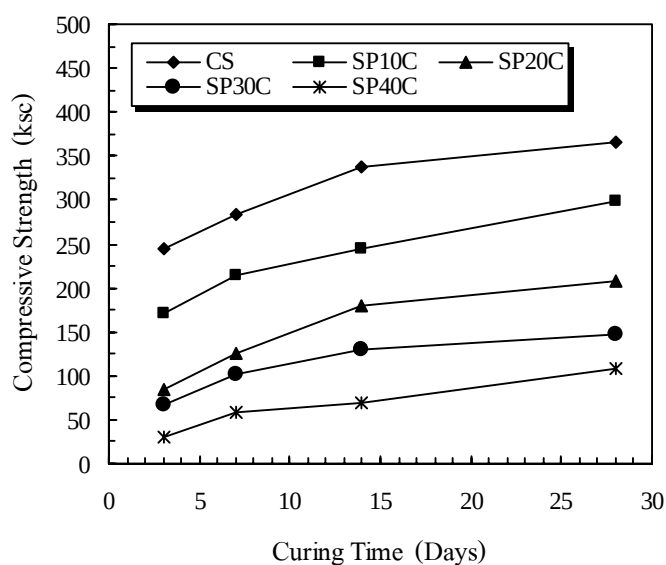


รูปที่ 4.10 กราฟกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เฟอร์ไรท์ Type 1 แทนที่ทราย

ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เฟอร์ไรท์ Type 1 แทนที่ทรายมีค่าสูงที่สุด 216 ksc และมีค่าน้อยที่สุด 73 ksc เมื่อใช้เฟอร์ไรท์ Type 1 แทนที่ทราย 10 และ 40% ซึ่งมีค่าลดลง 40.99 และ 80.03% ของมอร์ต้ารควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ

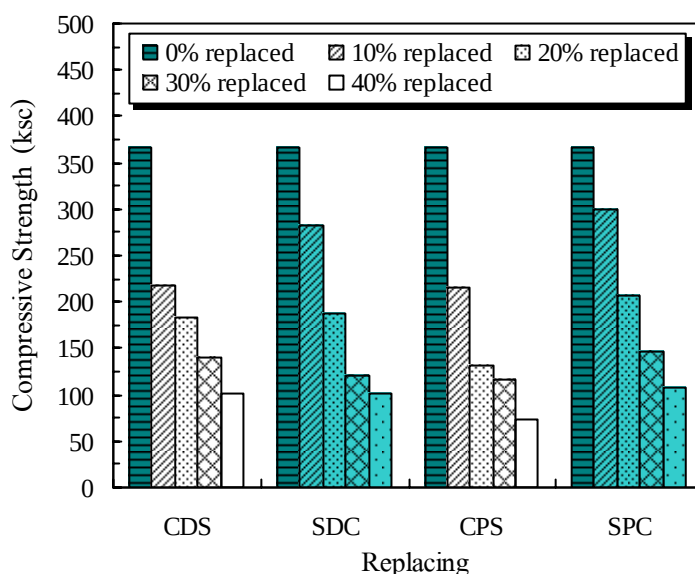
4) กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เฟอร์ไรท์ Type 1 แทนที่ปูนซีเมนต์

จากรูปที่ 4.11 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เฟอร์ไรท์ Type 1 แทนที่ปูนซีเมนต์มีลักษณะคล้ายคลึงกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์ โดยมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น แต่มีค่ากำลังอัดที่มากกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์ อย่างไรก็ตามการพัฒนา กำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นคล้ายกับมอร์ต้ารควบคุมตามอายุการบ่ม ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เฟอร์ไรท์ Type 1 แทนที่ปูนซีเมนต์มีค่าสูงที่สุด 299 ksc และมีค่าน้อยที่สุด 108 ksc เมื่อใช้เฟอร์ไรท์ Type 1 แทนที่ปูนซีเมนต์ 10 และ 40% ซึ่งมีค่าลดลง 18.30 และ 70.54% ของมอร์ต้ารควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 กราฟกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เฟอร์ไรท์ Type 1 แทนที่ปูนซีเมนต์

เมื่อพิจารณากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เฟอร์ไรท์ Type 1 เปรียบเทียบกับไคอะตอมไมท์ พบว่าการแทนที่ทรายด้วยเฟอร์ไรท์ Type 1 ให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าไคอะตอมไมท์ 0.95 และ 27.17% ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ 10 และ 40% ตามลำดับ แต่การแทนที่ปูนซีเมนต์พบว่าการแทนที่ด้วยเฟอร์ไรท์ Type 1 ให้ค่า กำลังอัดที่สูงกว่าไคอะตอมไมท์ โดยในการแทนที่ด้วยเฟอร์ไรท์ Type 1 ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าไคอะตอมไมท์ 5.60 และ 27.17% ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ 10 และ 40% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.12



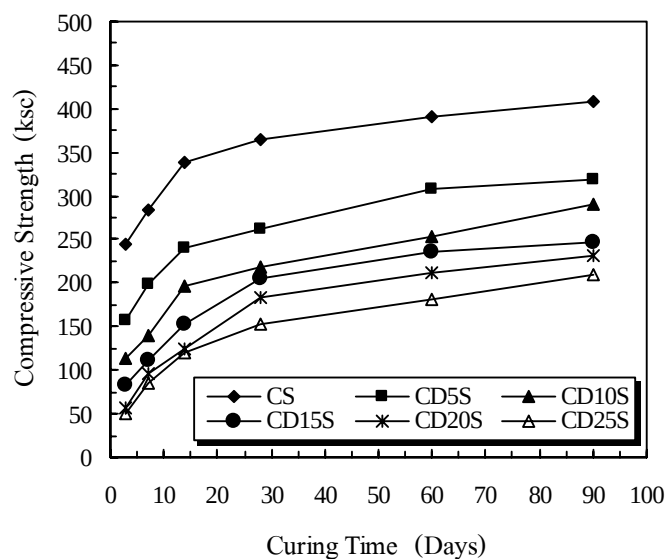
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม ที่อายุการบ่ม 28 วัน

ในการพิจารณาค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม ยังมีปัจจัยอื่นที่ควรคำนึงถึงด้วย เช่น ค่าหน่วยน้ำหนัก ที่ต้องคำนึงถึงเพื่อต้องการคอนกรีตมวลเบาที่มีค่ากำลังอัดสูงและมีหน่วยน้ำหนักต่ำ เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งาน

4.6.2 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ

1) กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติโดยการแทนที่ทราย

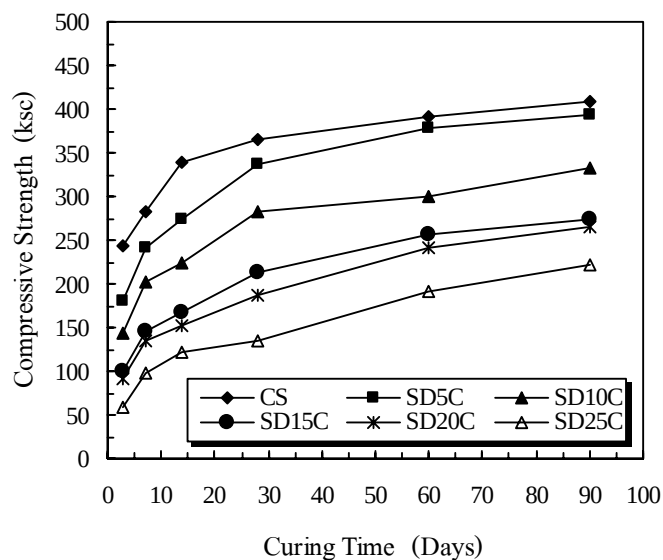
จากรูปที่ 4.13 พบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มโดยการแทนที่ทราย มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ทรายที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุม ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทราย 5% มีค่าสูงที่สุด 262 และ 320 ksc ซึ่งมีค่าลดลง 40.42 และ 72.58% และเมื่อใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทราย 25% มีค่าน้อยที่สุด 153 และ 210 ksc ซึ่งมีค่าลดลง 40.42 และ 72.58% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 กราฟกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ
โดยการแทนที่ทราย

2) กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติโดยการ แทนที่ปูนซีเมนต์

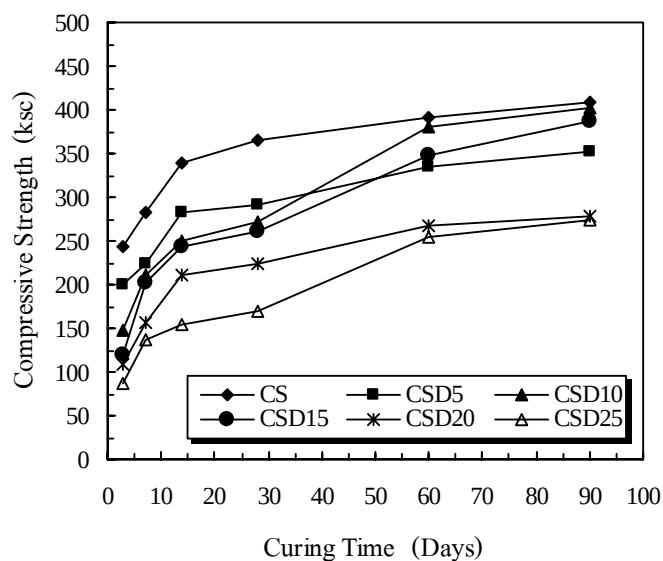
ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุม ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 5% มีค่าสูงที่สุด 337 และ 394 ksc มีค่าลดลง 7.92 และ 3.38% ซึ่งมีค่าลดลงที่น้อยกว่าการแทนที่ทราย และเมื่อใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 25% มีค่ากำลังอัดน้อยที่สุด 135 และ 221 ksc มีค่าลดลง 62.98 และ 45.90% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ
โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์

3) กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติโดยการผสมเพิ่ม

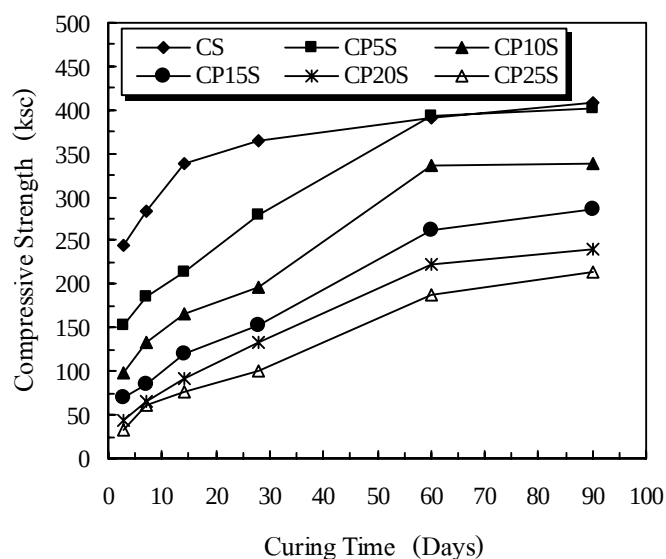
ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มโดยการผสมเพิ่ม มีค่าลดลงตามปริมาณการผสมเพิ่มที่เพิ่มขึ้น แต่กำลังอัดลดลงน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การแทนที่ทรายและแทนที่ปูนซีเมนต์ ส่วนการพัฒนา กำลังอัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุม ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์ผสมเพิ่ม 10% รับกำลังอัดได้ดีที่สุด 273 และ 401 ksc มีค่าลดลง 25.44 และ 1.69% และเมื่อใช้ไคอะตอมไมท์ผสมเพิ่ม 15% มีค่ากำลังอัด 261 และ 386 ksc มีค่าลดลง 28.67 และ 5.38% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 กราฟกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการผสมเพิ่ม

4) กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ทราย

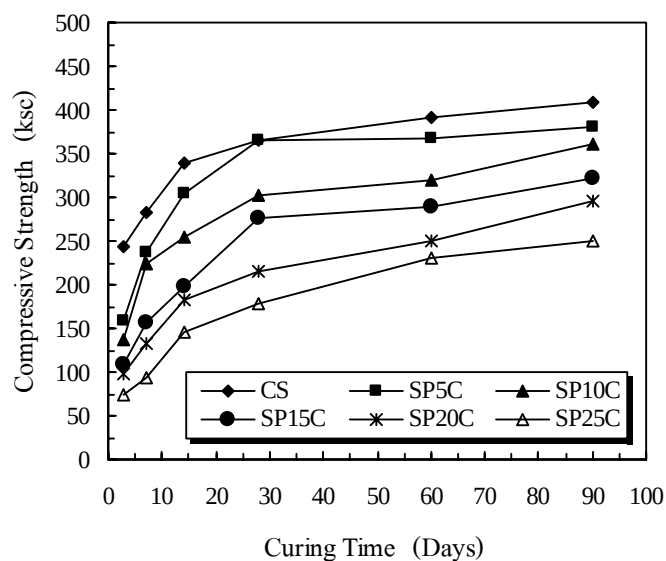
จากรูปที่ 4.16 พบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มโดยการแทนที่ทราย มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ทรายที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุม ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 แทนที่ทราย 5% มีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุม โดยมีค่าสูงที่สุด 279 และ 401 ksc ซึ่งมีค่าลดลงเพียง 23.55 และ 1.70% ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ แต่ที่อายุ 60 วัน มีค่ากำลังอัดเพิ่มสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม โดยมีค่ากำลังอัดประมาณ 393 ksc ซึ่งสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม 0.36%



รูปที่ 4.16 กราฟกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ทราย

5) กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์

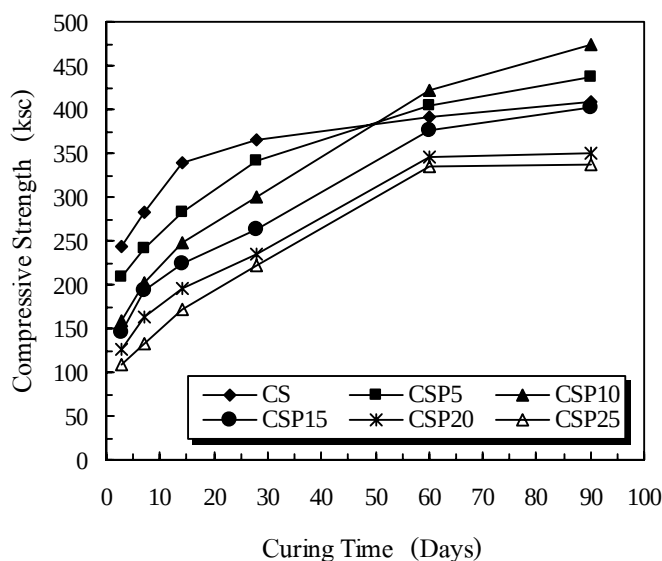
ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุม ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 แทนที่ปูนซีเมนต์ 5% มีค่าลดลงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การแทนที่ทราย ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่เท่ากัน โดยมีค่าสูงที่สุด 365 และ 381 ksc มีค่าลดลง 0.17 และ 6.57% และเมื่อใช้เพอร์ไลต์ Type 2 แทนที่ปูนซีเมนต์ 25% มีค่ากำลังอัดน้อยที่สุด 179 และ 250 ksc มีค่าลดลง 51.15 และ 38.88% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 กราฟกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์

6) กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการผสมเพิ่ม

ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มโดยการผสมเพิ่ม มีค่าลดลงที่ปริมาณการผสมเพิ่ม 20 และ 25% แต่กำลังอัดที่เปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม 5, 10 และ 15% มีค่าลดลงน้อยมากหรือมีค่าเพิ่มมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมในบางช่วงอายุการบ่ม โดยเปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม 5% มีค่ากำลังอัด 342, 405 และ 437 ksc มีค่าลดลง 6.43 และมีค่าเพิ่มขึ้น 3.54 และ 7.14% ส่วนการใช้เพอร์ไลต์ Type 2 ผสมเพิ่ม 10% มีค่ากำลังอัด 300, 423 และ 473 ksc มีค่าลดลง 17.92 และมีค่าเพิ่มสูงขึ้น 8.04 และ 15.89% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการใช้เพอร์ไลต์ Type 2 ผสมเพิ่ม 15% ค่ากำลังอัดมีค่าลดลงน้อยมากหรือใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุมเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น โดยมีค่ากำลังอัด 263, 377 และ 401 ksc มีค่าลดลง 28.05, 3.74 และ 1.71% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.18

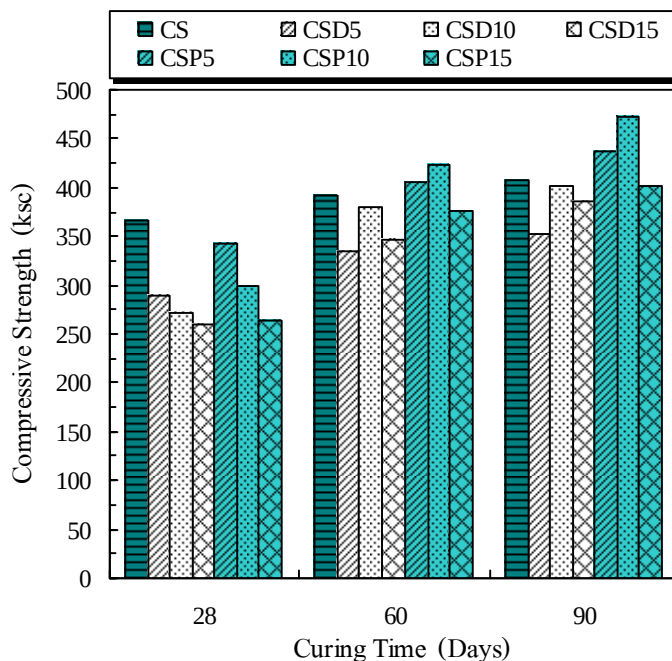


รูปที่ 4.18 กราฟกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการผสมเพิ่ม

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกำลังอัดของวัสดุปอชโซลานธรรมชาติทั้ง 2 ชนิด เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม ที่เปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม 5, 10 และ 15% ที่อายุการบ่ม 28, 60 และ 90 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุการบ่มมากขึ้นของมอร์ตาร์ที่ผสมเพอร์ไลต์ Type 2 ที่ 5 และ 10% มีค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมด้วยไคอะตอมไมท์และมอร์ตาร์ควบคุม โดยที่การผสมเพิ่ม 5% มีค่ากำลังอัด 405 และ 437 ksc เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ผสมเพิ่มด้วยไคอะตอมไมท์ที่เปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่มเดียวกันที่มีค่ากำลังอัด 334 และ 352 ksc พบว่ามีค่ามากกว่า 21.18 และ 24.44% และมีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ที่มีค่ากำลังอัด 391 และ 408 ksc อยู่ 3.54 และ 7.14% ที่อายุการบ่ม 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ส่วนการใช้เพอร์ไลต์ Type 2 ผสมเพิ่ม 10% มีค่ากำลังอัด 423 และ 473 ksc เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ผสมเพิ่มด้วยไคอะตอมไมท์ที่เปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่มเดียวกันที่มีค่ากำลังอัด 380 และ 347 ksc พบว่ามีค่ามากกว่า 11.24 และ 36.25% และมีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม 8.04 และ 15.89% ที่อายุการบ่ม 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

ในการใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม มีประสิทธิภาพมากกว่าไคอะตอมไมท์ และได้รับค่ากำลังอัดที่สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม แต่ควรใช้ในปริมาณที่เหมาะสม คือ ที่เปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม 5 ถึง 10% เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการพัฒนากำลังอัดมากที่สุด อย่างไรก็ตามการใช้ไคอะตอมไมท์ในส่วนผสมที่เปอร์เซ็นต์การผสม

เพิ่ม 5 ถึง 10% สามารถทำได้ และมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุม แต่การพัฒนากำลังต่ำกว่าเพอร์ไลต์ Type 2 จึงต้องการอายุการบ่มมากขึ้น เพราะจากการสังเกตข้อมูลผลการทดสอบพบว่า มีแนวโน้มในการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ



รูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้โคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ผสมเพิ่มในส่วนผสม 5, 10 และ 15% ที่อายุการบ่ม 28, 60 และ 90 วัน

4.7 หน่วยน้ำหนัก

4.7.1 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้โคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม

ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ในส่วนผสม ทั้งการแทนที่ทรายและปูนซีเมนต์มีค่าต่ำกว่าการใช้โคอะตอมไมท์ เนื่องจากเพอร์ไลต์ Type 1 มีความพรุนมากกว่า และมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าโคอะตอมไมท์ ค่าหน่วยน้ำหนักที่มีค่าต่ำสุดที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ทราย 40% มีค่าหน่วยน้ำหนัก $1,115 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ทรายด้วยโคอะตอมไมท์ 38.59% ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่เท่ากัน และมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม 94.96% ส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลต์ Type 1 มีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำสุดที่ปริมาณการแทนที่ 40% เช่นกัน โดยมีค่าหน่วยน้ำหนัก $1,640 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยโคอะตอมไมท์ 14.28% ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่เท่ากัน และมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม 25.53%

ตารางที่ 4.3 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์ Type 1 ใน ส่วนผสม

Curing Time (Days)	Unit Weight (kg/m ³)			
	3	7	14	28
CS	2,180	2,195	2,000	2,205
CD10S	2,055	2,075	2,115	2,125
CD20S	1,965	1,980	2,000	2,015
CD30S	1,830	1,860	1,870	1,890
CD40S	1,745	1,800	1,810	1,820
SD10C	2,045	2,050	2,115	2,135
SD20C	1,960	1,975	2,040	2,070
SD30C	1,895	1,900	1,945	1,995
SD40C	1,810	1,815	1,875	1,915
CP10S	1,820	1,825	1,825	1,830
CP20S	1,505	1,545	1,565	1,595
CP30S	1,215	1,270	1,345	1,395
CP40S	1,035	1,055	1,100	1,115
SP10C	1,980	2,035	2,040	2,050
SP20C	1,800	1,840	1,880	1,865
SP30C	1,675	1,710	1,730	1,755
SP40C	1,530	1,535	1,570	1,640

หมายเหตุ หน่วยน้ำหนักที่ทดสอบเป็นหน่วยน้ำหนักแห้งในอากาศ (air dry unit weight)

4.7.2 หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ

จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม สรุปได้ว่าปริมาณของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ที่ผสมเพิ่ม 5, 10 และ 15% มีการพัฒนาโครงสร้างจากปฏิกิริยาปอชโซลานภายในเนื้อของมอร์ตาร์ทำให้โครงสร้างของมอร์ตาร์แน่นขึ้นหรือที่เรียกกันว่า Filler Effect คล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุม จึงส่งผลให้มีค่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นที่อายุการบ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.4 หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ในส่วนผสม 5, 10 และ 15% เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ

Curing Time (Days)	Unit Weight (kg/m ³)					
	3	7	14	28	60	90
CS	2,180	2,195	2,200	2,205	2,240	2,280
CSD5	2,125	2,125	2,125	2,135	2,150	2,150
CSD10	1,980	2,050	2,070	2,100	2,130	2,140
CSD15	1,955	2,020	2,050	2,080	2,105	2,110
CSP5	2,135	2,160	2,160	2,165	2,180	2,190
CSP10	2,080	2,080	2,090	2,115	2,150	2,155
CSP15	2,030	2,055	2,060	2,060	2,110	2,110

อย่างไรก็ตาม ในการใช้เพอร์ไลต์ Type 2 ในปริมาณมากเกินไปจะส่งผลให้ค่าหน่วยน้ำหนักบางอัตราส่วนมีค่าลดลงที่อายุการบ่ม 90 วัน ดังแสดงในตารางที่ ข.5 ถึง ข.10 ซึ่งเป็นสาเหตุเนื่องจากปริมาณที่มากเกินไปทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ หรืออาจเกิดปฏิกิริยามากเกินไปทำให้มอร์ตาร์เกิดการขยายตัวและเกิดช่องว่างที่น้ำสามารถแทรกซึมผ่านได้ จนทำให้ Calcium Sulfoaluminate แทรกซึมออกมาได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (ก) และ (ข) ทำให้หน่วยน้ำหนักลดลง ส่งผลให้การพัฒนากำลังลดต่ำลงด้วย



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.20 แสดงลักษณะของ Calcium Sulfoaluminate ที่มีลักษณะเป็นแผ่น

เมื่อมีช่องว่างในโครงสร้างของมอร์ตาร์ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จะขยายเข้าสู่ช่องว่างและจะหยุดเมื่อไม่มีช่องว่างเหลืออยู่ และยังเป็นสารประกอบที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความคงทนลดลงเนื่องจากเป็นสารที่ละลายได้และถูกชะล้าง (leach) ออกมาได้ง่าย นอกจากนี้การให้กำลังของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ก่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังที่ได้จากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และเมื่อไม่มีช่องว่างเหลืออยู่ Ettringite จะพยายามดันส่วนที่อยู่รอบ ๆ ออก เกิดแรงดันในเนื้อซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว ทำให้ซีเมนต์เพสต์ขยายตัวและแตกร้าว เมื่อไอออนของซัลเฟตหมด Ettringite จะทำปฏิกิริยาและเปลี่ยนเป็น Calcium Sulfoaluminate ที่มีลักษณะเป็นแผ่น (ปริญญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

4.8 อัตราส่วนกำลัง

โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุระหว่าง 7 ถึง 14 วัน และมีปฏิกิริยาไปเรื่อย ๆ (ปริญญญา จินดาประเสริฐ, 2547) ค่าอัตราส่วนกำลังเป็นค่าที่สามารถบ่งบอกถึงความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน จากผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมไดอะตอมไมท์ที่มีค่าอัตราส่วนกำลังที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 0.79 และ 0.75 และเพอร์ไลต์ Type 2 มีค่าเท่ากับ 0.94 และ 0.82 ที่เปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม 5 และ 10% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าปอซโซลานทั้งสองชนิดมีอัตราส่วนกำลังใกล้เคียงเกณฑ์มาตรฐานที่ได้กำหนดค่าอัตราส่วนกำลัง หรือที่เรียกตาม ASTM C 618 ว่า “ค่าดัชนีกำลัง” ต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุมที่อายุการบ่ม 7 หรือ 28 วัน และสรุปได้ว่าเพอร์ไลต์ Type 2 มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่าไดอะตอมไมท์ เนื่องจากมีความเป็นอสัณฐานมากกว่า ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าอัตราส่วนกำลังของมอร์ตาร์ที่ใช้ไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ในส่วนผสม 5, 10 และ 15% เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ

Curing Time (Days)	CS	CSD5	CSD10	CSD15	CSP5	CSP10	CSP15
7	1.00	0.79	0.75	0.71	0.85	0.71	0.68
28	1.00	0.79	0.75	0.71	0.94	0.82	0.72

4.9 การวิเคราะห์ราคา

4.9.1 การเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตมวลเบาผสมไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 กับราคาคอนกรีตมวลเบาในท้องตลาด

จากตารางการเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม 40% กับราคาท้องตลาดทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 40% (D40C SUT Block) มีราคา 28.95 บาทต่อก้อน ซึ่งมีราคาต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาที่ขายในท้องตลาด 3.05 ถึง 4.65 บาทต่อก้อน เนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในการผลิตลง แต่อย่างไรก็ตาม D40C SUT Block ยังมีน้ำหนักต่อก้อนที่มากกว่าคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาด โดยมีน้ำหนัก 22.98 kg/ก้อน ซึ่งมากกว่าน้ำหนักต่อก้อนของคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาด 3.5 ถึง 15.5 kg/ก้อน แต่เมื่อพิจารณาในเรื่องของกำลังอัด พบว่า D40C SUT Block มีค่ามากกว่าประมาณ 20 ถึง 70 ksc ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่า ถ้าต้องการค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาดจะให้น้ำหนักต่อก้อนของ D40C SUT Block ลดลง

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม 40% กับราคาท้องตลาดทั่วไป

ผลิตภัณฑ์	น้ำหนัก/ก้อน* (kg)	น้ำหนัก/ลบ.ม. (kg/m ³)	กำลังอัด (ksc)	ราคา/ก้อน (บาท)	ราคา/ตร.ม. (บาท)
CLC Sepur Block	19.35	1,610	≥ 50	33.60	282
AAC P-CAC Block	7.45 - 10.90	620 - 910	30 - 50	31.20	260
AAC C-QON Block	≈ 8.5	≈ 700	30 - 80	32.00	266
D40S SUT Block	21.85	1,819	100	45.81	382
D40C SUT Block	23.00	1,916	102	28.95	241
P40S SUT Block	13.40	1,117	73	54.84	455
P40C SUT Block	19.70	1,642	108	39.23	327

หมายเหตุ : * = คอนกรีตมวลเบาขนาด 0.20×0.60×0.10 m

D40S SUT Block = SUT คอนกรีตมวลเบาที่ผลิตจากการใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทราย 40%

D40C SUT Block = SUT คอนกรีตมวลเบาที่ผลิตจากการใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 40%

P40S SUT Block = SUT คอนกรีตมวลเบาที่ผลิตจากการใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ทราย 40%

P40C SUT Block = SUT คอนกรีตมวลเบาที่ผลิตจากการใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ปูนซีเมนต์ 40%

สำหรับการผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ทราย 40% (P40S SUT Block) ทำให้น้ำหนักต่อก้อนมีค่าต่ำที่สุด 13.40 kg/ก้อน และมีค่ากำลังอัด 73 ksc ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาดมากที่สุด แต่เมื่อพิจารณาถึงราคาต่อก้อนยังถือว่าแพงกว่ามาก ส่วนการผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ปูนซีเมนต์ 40% (P40C SUT Block) มีราคา 39.23 บาทต่อก้อน ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาดมากที่สุด แต่ยังมีความเป็นไปได้ในการลดน้ำหนักต่อก้อนลงเนื่องจากยังมีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาดค่อนข้างมาก

ถึงแม้ว่าการผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 มีราคา และน้ำหนักต่อก้อนที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาด แต่ยังมีความเป็นไปได้ในการลดน้ำหนักและราคา เนื่องจากยังมีกำลังอัดที่สูงกว่า ดังนั้นในการผลิตอาจทำการเพิ่มปริมาณในแทนที่มากขึ้นเพื่อลดน้ำหนักต่อก้อนลง แต่จะทำให้กำลังอัดลดลงด้วยเพราะในการเพิ่มปริมาณไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสมทำให้กำลังอัดลดลงตามอัตราส่วน อย่างไรก็ตามในการผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ยังมีความเป็นไปได้โดยอาจมีการปรับสัดส่วนในการผสมให้เหมาะสมมากยิ่งขึ้นทั้ง น้ำหนัก กำลังอัด และราคาต่อก้อน เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานต่อไป

4.9.2 การเปรียบเทียบราคาของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ที่ใช้เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติกับคอนกรีตทั่วไปและถ่าลอย

จากการเปรียบเทียบราคาโดยการลองคำนวณการใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติกับคอนกรีตทั่วไป (C300_{cy}) และถ่าลอย ดังตารางที่ 4.6 พบว่าทั้งการใช้ถ่าลอย ไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์ Type 2 ผสมเพิ่มในส่วนผสมด้วยการผสมเพิ่ม 10% โดยไม่มีการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง (FA10⁺, D10⁺, P10⁺) ทำให้ราคาคอนกรีตต่อลูกบาศก์เมตร เพิ่มขึ้น 11.55, 93.50 และ 453.11 บาท ตามลำดับ เนื่องจากการผสมเพิ่ม (ดูตารางที่ ค.10 ถึง ค.11 ประกอบ) จึงทำให้อัตราส่วนต่าง ๆ ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ทั้งปูนซีเมนต์ ทราย และหิน ลดลงตามไปด้วย จึงสามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ได้เพียง 6.31, 6.76 และ 14.41 กิโลกรัม คิดเป็นราคาปูนซีเมนต์ ที่ลดลง 18.92, 20.28 และ 43.24 บาทต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร และสามารถลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลงได้ 4, 7 และ 55 kg/m³ ตามลำดับ

เป็นที่น่าสังเกตว่าเหตุใดราคาคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานทั้งถ่าลอย ไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์ Type 2 ผสมเพิ่มในส่วนผสมโดยไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์จึงมีราคาเพิ่มขึ้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองคำนวณราคาของคอนกรีตที่ใช้ถ่าลอย ไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์ Type 2 แทนที่ปูนซีเมนต์ 10% (FA10C, D10C, P10C) จากผลการ

คำนวณพบว่าทั้ง FA10C, D10C และ P10C สามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ได้ 36.40 กิโลกรัม คิดเป็นราคาปูนซีเมนต์ที่ลดลง 109.20 บาทต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร และสามารถลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลงได้ 51, 54 และ 111 kg/m³ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.6) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับ C300_{cy} พบว่าทั้ง D10C และ P10C นั้น ส่งผลให้ราคาต้นทุนคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร เพิ่มขึ้น 7.76 บาท และเพอร์ไลต์ Type 2 สูงถึง 387.40 บาท แต่ FA10C มีราคาต้นทุนลดลง 75.40 บาทต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร เนื่องจากเถ้าลอยมีราคาเพียง 1,000 บาทต่อตัน ในขณะที่ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 มีราคาถึง 3,300 และ 14,000 บาทต่อตัน ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้เถ้าลอยในส่วนผสมที่จะสามารถทำให้ลดราคาก่อสร้างได้นั้นจะต้องผสมเข้าไปโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์เพียงเท่านั้น แต่จะส่งผลให้กำลังอัดในช่วงแรกมีค่าลดลง และเหมาะสมกับคอนกรีตที่เทในปริมาณมาก ๆ ที่ไม่ต้องการกำลังอัดในช่วงอายุต้นที่สูง

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 กับคอนกรีตทั่วไปและคอนกรีตผสมเถ้าลอย

รายการ	ปริมาณ ซีเมนต์ (kg/m ³)	ราคา ซีเมนต์ (บาท/m ³)	ราคา คอนกรีต (บาท/m ³)	หน่วย น้ำหนัก (kg/m ³)	ผลต่างของ			
					ปริมาณ ซีเมนต์ (kg/m ³)	ราคา ซีเมนต์ (บาท/m ³)	ราคา คอนกรีต (บาท/m ³)	หน่วย น้ำหนัก (kg/m ³)
C300 _{cy}	364.00	1,092.00	1,439.76	2,328	-	-	-	-
FA10C	327.60	982.80	1,364.37	2,277	-36.40	-109.20	-75.39	-51
D10C	327.60	982.80	1,447.53	2,274	-36.40	-109.20	+7.77	-54
P10C	327.60	982.80	1,827.16	2,217	-36.40	-109.20	+387.40	-111
FA10 ⁺	357.69	1,073.08	1,451.31	2,324	-6.31	-18.92	+11.55	-4
D10 ⁺	357.24	1,071.72	1,533.26	2,321	-6.76	-20.28	+93.50	-7
P10 ⁺	349.59	1,048.76	1,892.87	2,273	-14.41	-43.24	+453.11	-55

หมายเหตุ : C300_{cy} = คอนกรีตทั่วไปที่มีกำลังอัด 300 ksc ที่อายุ 28 วัน (ออกแบบตามมาตรฐาน ACI)

FA10C = คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ 10% (เพื่อเปรียบเทียบ แต่ไม่ระบุกำลังอัด)

D10C = คอนกรีตที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 10% กำลังอัด 210 ksc ที่อายุ 28 วัน

P10C = คอนกรีตที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 แทนที่ปูนซีเมนต์ 10% กำลังอัด 210 ksc ที่อายุ 28 วัน

FA10⁺ = คอนกรีตทั่วไปที่มีกำลังอัด 300 ksc ที่อายุ 28 วัน และผสมเพิ่มด้วยเถ้าลอย 10%

D10⁺ = คอนกรีตทั่วไปที่มีกำลังอัด 300 ksc ที่อายุ 28 วัน และผสมเพิ่มด้วยไคอะตอมไมท์ 10%

P10⁺ = คอนกรีตทั่วไปที่มีกำลังอัด 300 ksc ที่อายุ 28 วัน และผสมเพิ่มด้วยเพอร์ไลต์ Type 2 10%

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลต์ Type 2 10% ที่ส่งผลให้ค่าหน่วยน้ำหนักลดลงได้ถึง 111 kg/m^3 นั้น เป็นผลดีในด้านการลดหน่วยน้ำหนัก แต่ราคาค้นทุนการผลิตค่อนข้างสูงกว่าคอนกรีตทั่วไปมาก และถ้ามองถึงประโยชน์ด้านการลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ลงนั้น ทุกสัดส่วนผสมที่มีการนำวัสดุปอซโซลานทุกชนิดแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมที่เท่ากันสามารถลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ลงได้เท่ากัน แต่ถ้าทำการนำวัสดุปอซโซลานผสมเพิ่มเข้าไปโดยยังคงที่ปริมาณปูนซีเมนต์ต่อปริมาตรเท่าเดิมนั้นจะทำให้ราคาคอนกรีตต่อลูกบาศก์เมตรสูงขึ้น และยังสามารถสรุปได้ว่าวัสดุที่มีความเบาสามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมได้มากกว่าวัสดุที่มีน้ำหนักมากกว่า เพราะขึ้นอยู่กับน้ำหนักต่อปริมาตรของวัสดุปอซโซลานที่นำมาผสม

ในการนำวัสดุปอซโซลานทุกชนิดมาใช้ในส่วนผสมคอนกรีต สามารถลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ลงได้ ส่วนในการนำไปประยุกต์ใช้นั้นควรคำนึงถึงความเหมาะสมในเรื่องของความต้องการที่จะพยายามลดน้ำหนักของคอนกรีต ลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต หรือต้องการประหยัดราคาก่อสร้าง

บทที่ 5

บทสรุป

การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ในงานคอนกรีตมวลเบา สามารถสรุปได้ 2 ลักษณะ คือ ความเป็นไปได้ในการใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์เป็นวัสดุผสมมวลรวมเบาในงานคอนกรีตมวลเบา และความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม โดยมีข้อสรุป ดังนี้

5.1 สรุปผลงานวิจัย

5.1.1 ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในงานคอนกรีตมวลเบา

การใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบา ส่งผลมีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่ากำลังอัดค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดมีค่าสูงขึ้นตามอายุการบ่ม และจากคุณสมบัติที่เบา มีรูพรุนสูง สามารถลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตให้เบาลงได้

1) ไคอะตอมไมท์ในงานคอนกรีตมวลเบา

1.1) คอนกรีตมวลเบาที่มีการแทนที่ทรายและปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์ จะมีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น 4.55 และ 3.75% ทุกปริมาณการแทนที่ 10%

1.2) การแทนที่ทราย 40% มีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุด $1,820 \text{ kg/m}^3$ มีค่ากำลังอัด 100 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน

1.3) ไคอะตอมไมท์สามารถนำมาผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ และทำให้ประหยัดมากที่สุด ที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ 40% มีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุด $1,915 \text{ kg/m}^3$ มีค่ากำลังอัด 102 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน

1.4) คอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 40% (D40C SUT Block) มีราคา 28.95 บาทต่อก้อน ซึ่งมีราคาต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาที่ขายในท้องตลาด 3.05 ถึง 4.65 บาทต่อก้อน เนื่องจากมีการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในการผลิตลง มีน้ำหนัก 23.0 kg/ก้อน ซึ่งมากกว่าน้ำหนักต่อก้อนของคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาด 3.5 ถึง 15.5 kg/ก้อน แต่ค่ากำลังอัดมีค่ามากกว่าประมาณ 20 ถึง 70 ksc

2) เพอร์ไลต์ Type 1 ในงานคอนกรีตมวลเบา

2.1) คอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ทรายและปูนซีเมนต์จะมีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 20.00 และ 12.50% ทุกปริมาณการแทนที่ 10%

2.2) การใช้เพอร์ไลต์ Type 1 ในงานคอนกรีตมวลเบา ที่การแทนที่ทราย 40% มีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุด $1,115 \text{ kg/m}^3$ มีค่ากำลังอัด 73 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน

2.3) เพอร์ไลต์ Type 1 สามารถนำมาผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ และทำให้ประหยัดมากที่สุด ที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ 40% มีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุด $1,640 \text{ kg/m}^3$ มีค่ากำลังอัด 108 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน

2.4) คอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ทราย 40% (P40S SUT Block) มีน้ำหนักต่อก้อนต่ำที่สุด 13.4 kg/ก้อน และมีค่ากำลังอัด 73 ksc ซึ่งมีค่าหน่วยน้ำหนักและค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาด แต่ราคาต่อก้อนแพงกว่ามาก ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ 40% (P40C SUT Block) มีราคา 39.23 บาทต่อก้อน ซึ่งถือว่ามีราคาใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาดมากที่สุด แต่ยังมีความเป็นไปได้ในการลดน้ำหนักต่อก้อนลง เนื่องจากยังมีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาดค่อนข้างมาก

5.1.2 ไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ในการเป็นวัสดุปอซโซลาน

ผลรวมองค์ประกอบหลักทางเคมี SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 แสดงถึงคุณสมบัติการเป็นวัสดุปอซโซลาน ปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีความต้องการน้ำในส่วนผสมมากขึ้น อัตราส่วน W/B เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง แต่การพัฒนากำลังอัดมีค่าสูงขึ้นตามอายุการบ่ม ปริมาณที่เหมาะสมสามารถทำให้ได้กำลังอัดที่สูงที่สุด และจากคุณสมบัติที่เบา มีรูพรุนสูง ทำให้ลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตให้เบาลงสามารถลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้

1) ไดอะตอมไมท์ในการเป็นวัสดุปอซโซลาน

การแทนที่ทราย แทนที่ปูนซีเมนต์ และผสมเพิ่มด้วยไดอะตอมไมท์ทุก 5% จะส่งผลให้มีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 5.88, 3.88 และ 1.88% ตามลำดับ ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไดอะตอมไมท์ผสมเพิ่ม 10% มีค่ากำลังอัดลดลง 25.44 และ 1.69% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ และที่ปริมาณการผสมเพิ่ม 5 ถึง 10% คือค่าที่เหมาะสมที่สามารถทำให้กำลังอัดสูงสุด โดยมีค่า Strength Activity Index ที่อายุการบ่ม 28 วัน อยู่ในเกณฑ์กำหนด

2) เพอร์ไลต์ Type 2 ในการเป็นวัสดุปอซโซลาน

เพอร์ไลต์ Type 2 มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากไคอะตอมไมท์ คือ มีลักษณะไม่เป็นผลึก หรือมีรูปร่างอสัณฐาน มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าไคอะตอมไมท์ การแทนที่ทราย แทนที่ปูนซีเมนต์ และผสมเพิ่มด้วยเพอร์ไลต์ Type 2 ทุก 5% จะส่งผลให้มีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 32.28, 17.88 และ 15.48% ตามลำดับ ค่ากำลังอัดที่เปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม 5, 10 และ 15% มีค่าลดลงน้อยมากหรือมีค่าเพิ่มมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมในบางช่วงอายุการบ่ม โดยเปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม 5% มีค่ากำลังอัดลดลง 6.43 และมีค่าเพิ่มขึ้น 3.54 และ 7.14% ส่วนการผสมเพิ่ม 10% มีค่ากำลังอัดลดลง 17.92 และมีค่าเพิ่มสูงขึ้น 8.04 และ 15.89% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ปริมาณการผสมเพิ่ม 5 ถึง 15% คือค่าที่เหมาะสมที่สามารถทำให้กำลังอัดสูงสุด โดยมีค่า Strength Activity Index ที่อายุการบ่ม 28 วัน อยู่ในเกณฑ์กำหนด

ทั้งการใช้ไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์ผสมเพิ่ม 10% โดยไม่ลดปริมาณปูนซีเมนต์ ทำให้ราคาคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรเพิ่มขึ้น เนื่องจากการผสมเพิ่ม จึงทำให้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ ทราย และหิน ลดลงตามไปด้วย จึงสามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ได้เพียงเล็กน้อย แต่ถ้าต้องการลดราคาก่อสร้างลงจะต้องใช้สารปอซโซลานโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์หรือแทนที่มวลรวม และถ้ามองถึงประโยชน์ด้านการลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ลง ทุกสัดส่วนผสมที่มีการนำวัสดุปอซโซลานทุกชนิดแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ลงได้ แต่ในการประยุกต์ใช้งานควรคำนึงถึงความเหมาะสมในเรื่องของความต้องการที่จะพยายามลดน้ำหนักของคอนกรีต ลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต หรือต้องการประหยัดราคาก่อสร้าง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในการทำคอนกรีตมวลเบามีวิธีการที่ง่ายกว่าการผลิตคอนกรีตที่มีขายอยู่ตามท้องตลาด เนื่องจากสามารถผสมและหล่อเป็นก้อนได้โดยไม่ต้องใช้เทคโนโลยีในการผลิตมากนัก แต่ถ้าต้องการผลิตเพื่อจำหน่ายในปริมาณมาก ๆ อาจมีการเร่งกำลังอัดให้เร็วขึ้น โดยการบ่มด้วยไอน้ำที่ความกดดันสูงเกิน 100°C (high pressure steam curing) โดยใช้ Autoclave อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 160 ถึง 210°C ที่ความดัน 6 ถึง 20 atm จะได้คอนกรีตมวลเบาที่มีกำลังอัดที่อายุ 1 วัน เทียบเท่ากับคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2551) เพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณในการผลิตได้ ส่วนในเรื่องของราคาที่แพงกว่าคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาดนั้น ยังมีความเป็นไปได้ในการลดน้ำหนักต่อก้อนลง เนื่องจากยังมีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาดค่อนข้างมาก และจะเป็นการลดต้นทุนในการผลิตลงได้อีกด้วย

การศึกษาการฉาบคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสมก็เป็นเรื่องที่น่าสนใจ เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาดโดยทั่วไปมีวิธีการฉาบค่อนข้างยาก และจะต้องใช้ปูนฉาบเฉพาะคอนกรีตมวลเบาของยี่ห้อ นั้น ซึ่งอาจมีความเป็นไปได้ว่าคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 อาจใช้ปูนฉาบธรรมดาที่สามารถผสมขึ้นเองโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมทั่วไป

แม้ว่าการใช้ไคอะตอมไมท์ในส่วนผสมจะมีค่ากำลังอัดไม่สูงเท่าเพอร์ไลต์ แต่เมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการนำสารปอซโซลานธรรมชาติทั้งสองชนิดนี้มาใช้ร่วมกันในส่วนผสมเดิวน่าจะมีความเป็นไปได้ เนื่องจากไคอะตอมไมท์มีอนุภาคที่ละเอียดมากกว่า จึงน่าจะแทรกเข้าในช่องว่างได้ดีขึ้นมากกว่าการใช้เพอร์ไลต์เพียงอย่างเดียว

ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นในการนำไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์มาประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตมวลเบาเท่านั้น ข้อมูลในการศึกษาหรืออ้างอิงในเรื่องนี้ยังมีไม่มากพอ เพราะเป็นวัสดุใหม่ที่ต้องทำการศึกษาอีกมาก การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตมวลเบาโครงสร้าง (structural lightweight concrete) ก็เป็นสิ่งที่น่าสนใจ แต่ในการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ให้ได้คุณภาพที่ดี และมีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานนั้น ควรต้องคำนึงถึงปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสม เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความเบา และมีรูพรุนสูง จึงมีความต้องการน้ำในปริมาณมากในส่วนผสมจึงส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดไม่มากเท่าที่ควร ดังนั้นในการศึกษาครั้งต่อไปจึงควรมีการศึกษาในเรื่องผลกระทบของการนำสารลดน้ำจำนวนมาก หรือซิลิกาฟูมมาใช้ปรับปรุงคุณภาพรวมด้วย ซึ่งจะช่วยให้กำลังอัดที่สูงขึ้น เพื่อประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างต่อไป

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของ ไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และ เพอร์ไลต์ Type 2 โดย X-Ray Fluorescence (XRF)

Analyte	Concentration			
	Diatomite	Perlite Type 1	Perlite Type 2	
H ₂ O	3.000	-	4.000	Wt %
Al ₂ O ₃	9.927	10.455	10.733	Wt %
SiO ₂	68.266	75.162	71.316	Wt %
SO ₃	386	251	258	ppm
K ₂ O	1.645	9.462	8.346	Wt %
CaO	0.803	1.602	1.858	Wt %
TiO ₂	0.680	0.518	0.583	Wt %
Mn	331	892	722	ppm
Fe ₂ O ₃	15.216	2.385	2.581	Wt %
Cu	244	124	100	ppm
Zn	138	100	125	ppm
As	206	31	30	ppm
Rb	319	359	377	ppm
Sr	257	346	235	ppm
Ba	0.097	0.166	0.153	Wt %
Sn	25	-	-	ppm
Pb	344	-	-	ppm
La	-	184	-	ppm
Loss on Ignition (LOI)	8.11	1.02	1.25	Wt %
% Passing No. 325	87.3	-	82.5	Wt %

ตารางที่ ก.2 ค่าความถ่วงจำเพาะของไดอะตอมไมท์

SPECIFIC GRAVITY TEST

Sample Diatomite

Source หจก.เกษมปูนมาร์ลและปูนขาว เลขที่ 105/4 หมู่ 3 ต.ขุนโกลน อ.พระพุทธรบาท จ.สระบุรี
18120 โทร.036-266520

Determination No.	1	2
Temperature (t) °C	30	30
Density of Water (d _t) g/ml	0.9957	0.9957
Wt. Dry Sample (A) g	100.00	100.00
Wt. Pycnometer + Water + Sample (W ₁) g	1,482.50	1,481.50
Wt. Pycnometer + Water (W ₂) g	1,433.00	1,433.00
Apparent Sp.Gr. (t/t °C)		
$G_A (t / t \text{ } ^\circ\text{C}) = A / (A + W_2 - W_1)$	1.980	1.942
$G_A (4 / 4 \text{ } ^\circ\text{C}) = d_t G_A (t / t \text{ } ^\circ\text{C}) / 1.00$	1.972	1.933
$G_A (23 / 23 \text{ } ^\circ\text{C}) = d_t G_A (t / t \text{ } ^\circ\text{C}) / 0.9975$	1.977	1.938

$$\text{Average } G_A (4 / 4 \text{ } ^\circ\text{C}) = 1.953$$

$$\text{Average } G_A (23 / 23 \text{ } ^\circ\text{C}) = 1.957$$

Remarks : ASTM C 128 – 93

This test method covers the determination of apparent specific gravity, 23/23 °C (73.4/73.4°F)

Density of water = 0.9975 at temperature 23 °C

ตารางที่ ก.3 ค่าความถ่วงจำเพาะของเพอร์ไลต์ Type 1

SPECIFIC GRAVITY TEST

Sample : Perlite Type 1

Source : The Quick Cote Product Co., LTD จ.นครปฐม

Determination No.	1	2
Temperature (t) °C	30	30
Density of Water (d _t) g/ml	0.9957	0.9957
Wt. Dry Sample (A) g	70.00	72.00
Wt. Pycnometer + Water + Sample (W ₁) g	1,361.00	1,366.00
Wt. Pycnometer + Water (W ₂) g	1,433.00	1,433.00
Apparent Sp.Gr. (t/t °C)		
$G_A (t / t \text{ } ^\circ\text{C}) = A / (A + W_2 - W_1)$	0.493	0.518
$G_A (4 / 4 \text{ } ^\circ\text{C}) = d_t G_A (t / t \text{ } ^\circ\text{C}) / 1.00$	0.491	0.516
$G_A (23 / 23 \text{ } ^\circ\text{C}) = d_t G_A (t / t \text{ } ^\circ\text{C}) / 0.9975$	0.492	0.517

$$\text{Average } G_A (4 / 4 \text{ } ^\circ\text{C}) = 0.503$$

$$\text{Average } G_A (23 / 23 \text{ } ^\circ\text{C}) = 0.505$$

Remarks : ASTM C 128 – 93

This test method covers the determination of apparent specific gravity, 23/23 °C (73.4/73.4°F)

Density of water = 0.9975 at temperature 23 °C

ตารางที่ ก.4 ค่าความถ่วงจำเพาะของเพอร์ไลต์ Type 2

SPECIFIC GRAVITY TEST

Sample : Perlite Type 2

Source : The Quick Cote Product Co., LTD จ.นครปฐม

Determination No.		1	2
Temperature	(t) °C	32	32
Density of Water	(d _t) g/ml	0.9951	0.9951
Wt. Dry Sample (A)	g	75.00	75.00
Wt. Pycnometer + Water + Sample	(W ₁) g	1,428.50	1,426.50
Wt. Pycnometer + Water	(W ₂) g	1,433.50	1,433.50
Apparent Sp.Gr.	(t/t °C)		
$G_A (t / t \text{ } ^\circ\text{C}) = A / (A + W_2 - W_1)$		0.938	0.915
$G_A (4 / 4 \text{ } ^\circ\text{C}) = d_t G_A (t / t \text{ } ^\circ\text{C}) / 1.00$		0.933	0.910
$G_A (23 / 23 \text{ } ^\circ\text{C}) = d_t G_A (t / t \text{ } ^\circ\text{C}) / 0.9975$		0.935	0.912

$$\text{Average } G_A (4 / 4 \text{ } ^\circ\text{C}) = 0.922$$

$$\text{Average } G_A (23 / 23 \text{ } ^\circ\text{C}) = 0.924$$

Remarks : ASTM C 128 – 93

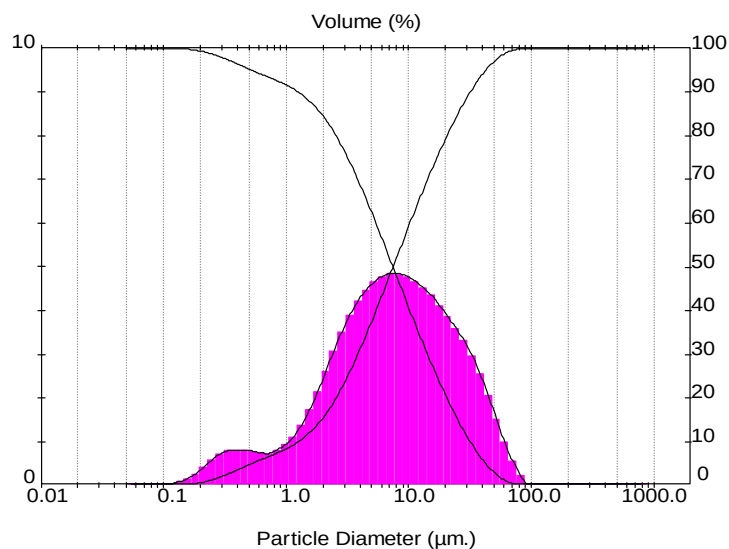
This test method covers the determination of apparent specific gravity, 23/23 °C (73.4/73.4°F)

Density of water = 0.9975 at temperature 23 °C

ตารางที่ ก.5 ตารางผลการทดสอบ Lazer Particle Size ของไคอะตอมไมท์

Result: Histogram Table

	Run No: 20	Measured: 3/10/107 10:12PM					
	Rec. No: 20	Analysed: 3/10/107 10:12PM					
Path: C:\SIZERS\DATA\	Source: Analysed						
Range: 300RF mm	Beam: 2.40 mm	Sampler: MS17					
Presentation: 3OHD	Analysis: Poly disperse	Obs': 19.8 %					
Modifications: None		Residual: 0.527 %					
Conc. = 0.0115 %Vol	Density = 1.000 g/cm^3	S.S.A. = 2.3502 m^2/g					
Distribution: Volume	D[4, 3] = 12.62 um	D[3, 2] = 2.55 um					
D(v, 0.1) = 1.26 um	D(v, 0.5) = 7.46 um	D(v, 0.9) = 31.89 um					
Span = 4.108E+00	Uniformity = 1.245E+00						
Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %
0.055	0.00	0.635	6.00	7.31	49.37	84.15	99.96
0.061	0.00	0.700	6.47	8.06	52.47	92.79	100.00
0.067	0.00	0.772	6.94	8.89	55.56	102.3	100.00
0.074	0.00	0.851	7.44	9.80	58.63	112.8	100.00
0.082	0.01	0.938	7.99	10.81	61.66	124.4	100.00
0.090	0.01	1.03	8.58	11.91	64.64	137.2	100.00
0.099	0.02	1.14	9.25	13.14	67.57	151.3	100.00
0.109	0.04	1.26	10.00	14.49	70.43	166.8	100.00
0.121	0.07	1.39	10.86	15.97	73.22	183.9	100.00
0.133	0.11	1.53	11.87	17.62	75.91	202.8	100.00
0.147	0.18	1.69	13.02	19.42	78.50	223.6	100.00
0.162	0.27	1.86	14.34	21.42	81.00	246.6	100.00
0.178	0.41	2.05	15.85	23.62	83.39	271.9	100.00
0.196	0.59	2.26	17.56	26.04	85.66	299.8	100.00
0.217	0.84	2.49	19.47	28.72	87.83	330.6	100.00
0.239	1.15	2.75	21.56	31.66	89.86	364.6	100.00
0.263	1.53	3.03	23.82	34.92	91.75	402.0	100.00
0.290	1.97	3.34	26.25	38.50	93.46	443.3	100.00
0.320	2.45	3.69	28.81	42.45	94.99	488.8	100.00
0.353	2.96	4.07	31.51	46.81	96.31	539.0	100.00
0.389	3.47	4.48	34.31	51.62	97.42	594.3	100.00
0.429	3.99	4.94	37.21	56.92	98.30	655.4	100.00
0.473	4.50	5.45	40.18	62.76	98.97	722.7	100.00
0.522	5.01	6.01	43.21	69.21	99.45	796.9	100.00
0.576	5.52	6.63	46.28	76.32	99.76	878.7	100.00

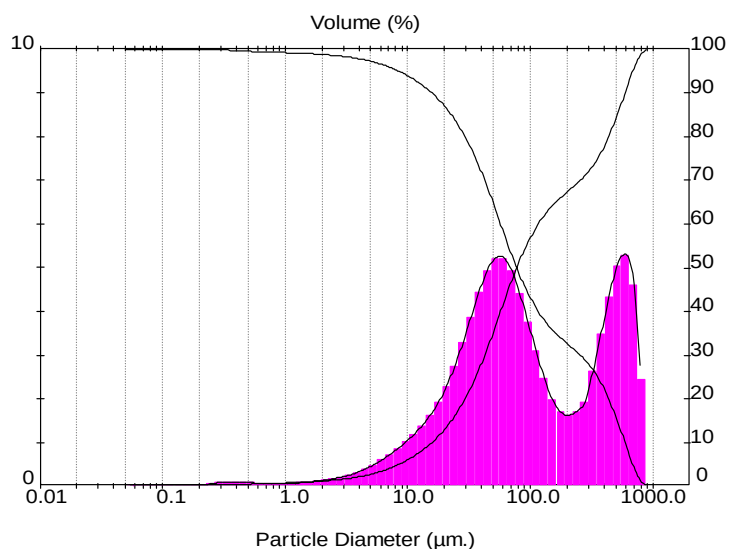


ตารางที่ ก.6 ตารางผลการทดสอบ Lazer Particle Size ของเพอร์ไลต์ Type 1

Result: Histogram Table

Path: C:\SIZERS\DATA\		Run No: 3	Measured: 3/10/107 9:28PM
		Rec. No: 3	Analysed: 3/10/107 9:28PM
		Source: Analysed	
Range: 300RF mm	Beam: 2.40 mm	Sampler: MS17	Obs': 15.8 %
Presentation: 3OHD	Analysis: Poly disperse	Residual: 0.515 %	
Modifications: None			
Conc. = 0.0637 %Vol	Density = 1.000 g/cm ³	S.S.A. = 0.2934 m ² /g	
Distribution: Volume	D[4, 3] = 201.65 um	D[3, 2] = 20.45 um	
D(v, 0.1) = 15.67 um	D(v, 0.5) = 77.68 um	D(v, 0.9) = 595.04 um	
Span = 7.458E+00	Uniformity = 2.125E+00		

Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %
0.055	0.00	0.635	0.64	7.31	4.25	84.15	52.35
0.061	0.00	0.700	0.68	8.06	4.75	92.79	54.98
0.067	0.00	0.772	0.71	8.89	5.32	102.3	57.34
0.074	0.00	0.851	0.75	9.80	5.95	112.8	59.43
0.082	0.00	0.938	0.79	10.81	6.64	124.4	61.25
0.090	0.00	1.03	0.82	11.91	7.41	137.2	62.82
0.099	0.00	1.14	0.86	13.14	8.25	151.3	64.18
0.109	0.00	1.26	0.91	14.49	9.18	166.8	65.38
0.121	0.00	1.39	0.96	15.97	10.22	183.9	66.48
0.133	0.00	1.53	1.02	17.62	11.36	202.8	67.51
0.147	0.00	1.69	1.09	19.42	12.64	223.6	68.55
0.162	0.00	1.86	1.16	21.42	14.07	246.6	69.63
0.178	0.01	2.05	1.25	23.62	15.67	271.9	70.76
0.196	0.02	2.26	1.34	26.04	17.47	299.8	72.03
0.217	0.03	2.49	1.45	28.72	19.49	330.6	73.59
0.239	0.06	2.75	1.57	31.66	21.74	364.6	75.51
0.263	0.10	3.03	1.70	34.92	24.24	402.0	77.77
0.290	0.15	3.34	1.86	38.50	26.98	443.3	80.39
0.320	0.22	3.69	2.04	42.45	29.95	488.8	83.34
0.353	0.29	4.07	2.24	46.81	33.10	539.0	86.58
0.389	0.35	4.48	2.47	51.62	36.39	594.3	89.96
0.429	0.42	4.94	2.74	56.92	39.75	655.4	93.34
0.473	0.48	5.45	3.05	62.76	43.10	722.7	96.44
0.522	0.54	6.01	3.40	69.21	46.36	796.9	98.62
0.576	0.59	6.63	3.80	76.32	49.46	878.7	100.00

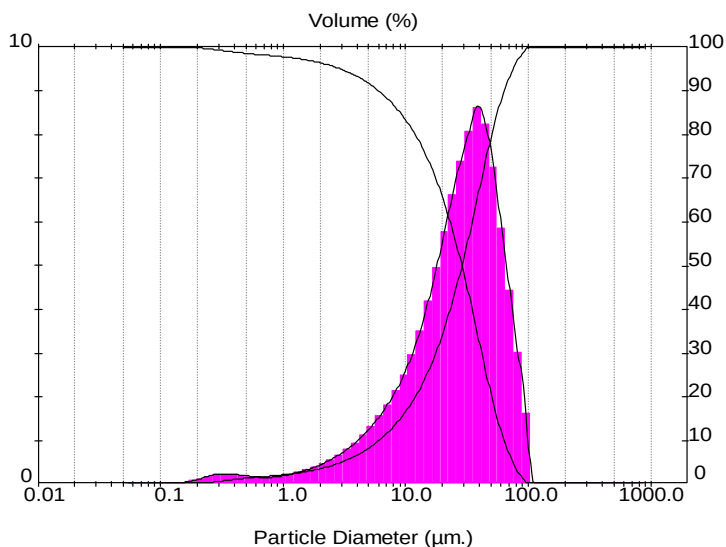


ตารางที่ ก.7 ตารางผลการทดสอบ Lazer Particle Size ของเพอร์ไลต์ Type 2

Result: Histogram Table

	Run No: 5	Measured: 3/10/107 9:37PM
	Rec. No: 5	Analysed: 3/10/107 9:37PM
Path: C:\SIZERS\DATA\		Source: Analysed
Range: 300RF mm	Beam: 2.40 mm	Sampler: MS17
Presentation: 3OHD	Analysis: Poly disperse	Obs': 15.0 %
Modifications: None		Residual: 0.467 %
Conc. = 0.0250 %Vol	Density = 1.000 g/cm^3	S.S.A.= 0.7711 m^2/g
Distribution: Volume	D[4, 3] = 32.30 um	D[3, 2] = 7.78 um
D(v, 0.1) = 6.03 um	D(v, 0.5) = 28.80 um	D(v, 0.9) = 63.78 um
Span = 2.005E+00	Uniformity = 6.142E-01	

Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %
0.055	0.00	0.635	1.73	7.31	12.14	84.15	97.42
0.061	0.00	0.700	1.83	8.06	13.39	92.79	99.05
0.067	0.00	0.772	1.92	8.89	14.78	102.3	99.96
0.074	0.00	0.851	2.03	9.80	16.32	112.8	100.00
0.082	0.00	0.938	2.14	10.81	18.03	124.4	100.00
0.090	0.00	1.03	2.26	11.91	19.93	137.2	100.00
0.099	0.01	1.14	2.40	13.14	22.05	151.3	100.00
0.109	0.01	1.26	2.55	14.49	24.42	166.8	100.00
0.121	0.02	1.39	2.73	15.97	27.07	183.9	100.00
0.133	0.03	1.53	2.92	17.62	30.02	202.8	100.00
0.147	0.05	1.69	3.14	19.42	33.30	223.6	100.00
0.162	0.08	1.86	3.39	21.42	36.93	246.6	100.00
0.178	0.12	2.05	3.66	23.62	40.90	271.9	100.00
0.196	0.18	2.26	3.97	26.04	45.22	299.8	100.00
0.217	0.26	2.49	4.32	28.72	49.86	330.6	100.00
0.239	0.36	2.75	4.71	31.66	54.77	364.6	100.00
0.263	0.49	3.03	5.15	34.92	59.96	402.0	100.00
0.290	0.63	3.34	5.63	38.50	65.43	443.3	100.00
0.320	0.79	3.69	6.18	42.45	70.94	488.8	100.00
0.353	0.94	4.07	6.78	46.81	76.22	539.0	100.00
0.389	1.09	4.48	7.46	51.62	81.15	594.3	100.00
0.429	1.24	4.94	8.21	56.92	85.59	655.4	100.00
0.473	1.37	5.45	9.05	62.76	89.42	722.7	100.00
0.522	1.50	6.01	9.98	69.21	92.69	796.9	100.00
0.576	1.62	6.63	11.00	76.32	95.36	878.7	100.00



ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของมอร์ตาร์

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมไคอะตอมไมท์
โดยการแทนที่ทราย

Sample	Unit Weight (kg/m ³)				Compressive Strength (ksc)			
	Curing Time (Days)							
	3	7	14	28	3	7	14	28
CS	2,180	2,195	2,200	2,205	244	283	338	366
CD10S	2,055	2,075	2,115	2,125	114	141	197	218
CD20S	1,965	1,980	2,000	2,015	56	95	124	183
CD30S	1,830	1,860	1,875	1,890	43	67	100	141
CD40S	1,745	1,800	1,810	1,819	30	47	77	100

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมไคอะตอมไมท์
โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์

Sample	Unit Weight (kg/m ³)				Compressive Strength (ksc)			
	Curing Time (Days)							
	3	7	14	28	3	7	14	28
CS	2,180	2,195	2,200	2,205	244	283	338	366
SD10C	2,045	2,050	2,115	2,135	143	201	225	283
SD20C	1,960	1,975	2,040	2,070	91	136	153	187
SD30C	1,895	1,900	1,945	1,995	48	78	100	120
SD40C	1,810	1,815	1,875	1,915	28	51	83	102

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเปอร์ไลต์
โดยการแทนที่ทราย

Sample	Unit Weight (kg/m ³)				Compressive Strength (ksc)			
	Curing Time (Days)							
	3	7	14	28	3	7	14	28
CS	2,180	2,195	2,200	2,205	244	283	338	366
CP10S	1,820	1,825	1,825	1,830	142	164	189	216
CP20S	1,510	1,545	1,565	1,595	56	79	120	132
CP30S	1,215	1,270	1,345	1,395	34	55	102	117
CP40S	1,035	1,055	1,100	1,115	29	39	53	73

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเปอร์ไลต์
โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์

Sample	Unit Weight (kg/m ³)				Compressive Strength (ksc)			
	Curing Time (Days)							
	3	7	14	28	3	7	14	28
CS	2,180	2,195	2,200	2,205	244	283	338	366
SP10C	1,980	2,035	2,040	2,050	172	215	244	299
SP20C	1,780	1,840	1,860	1,865	85	126	180	207
SP30C	1,675	1,715	1,730	1,755	67	101	129	147
SP40C	1,530	1,535	1,570	1,640	30	59	69	108

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมโคอะตอมไมท์เพื่อใช้เป็นสาร
ป่อโซลันธรรมชาติ โดยการแทนที่ทราย

Sample	Unit Weight (kg/m ³)					
	Curing Time (Days)					
	3	7	14	28	60	90
CS	2,180	2,195	2,200	2,205	2,240	2,280
CD5S	2,130	2,145	2,145	2,170	2,200	2,210
CD10S	2,120	2,100	2,120	2,125	2,140	2,180
CD15S	2,015	2,025	2,035	2,085	2,100	2,110
CD20S	1,970	1,980	2,000	2,015	2,050	2,055
CD25S	1,885	1,905	1,945	1,970	1,985	2,000

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมโคอะตอมไมท์เพื่อใช้เป็นสาร
ป่อโซลันธรรมชาติ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์

Sample	Unit Weight (kg/m ³)					
	Curing Time (Days)					
	3	7	14	28	60	90
CS	2,180	2,195	2,200	2,205	2,240	2,280
SD5C	2,115	2,135	2,160	2,185	2,220	2,260
SD10C	2,085	2,090	2,145	2,165	2,175	2,210
SD15C	2,010	2,025	2,082	2,120	2,130	2,160
SD20C	1,980	1,985	2,050	2,075	2,100	2,135
SD25C	1,900	1,920	1,960	1,995	2,005	2,030

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมไคอะตอมไมท์เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการผสมเพิ่ม

Sample	Unit Weight (kg/m ³)					
	Curing Time (Days)					
	3	7	14	28	60	90
CS	2,180	2,195	2,200	2,205	2,240	2,280
CSD5	2,125	2,125	2,125	2,135	2,150	2,150
CSD10	1,980	2,050	2,070	2,100	2,130	2,135
CSD15	1,955	2,015	2,050	2,080	2,105	2,110
CSD20	1,935	2,000	2,005	2,045	2,060	2,065
CSD25	1,925	1,950	1,965	2,010	2,025	2,045

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเพอร์ไลต์เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ทราย

Sample	Unit Weight (kg/m ³)					
	Curing Time (Days)					
	3	7	14	28	60	90
CS	2,180	2,195	2,200	2,205	2,240	2,280
CP5S	2040	2,045	2,065	2,095	2,120	2,100
CP10S	1,895	1,925	1,925	1,960	1,980	1,960
CP15S	1,765	1,780	1,780	1,815	1,870	1,835
CP20S	1,670	1,680	1,685	1,720	1,760	1,725
CP25S	1,560	1,580	1,610	1,635	1,670	1,660

ตารางที่ ข.9 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเพอร์ไลต์เพื่อใช้เป็นสารป่อชโซลาน
ธรรมชาติ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์

Sample	Unit Weight (kg/m ³)					
	Curing Time (Days)					
	3	7	14	28	60	90
CS	2,180	2,195	2,200	2,205	2,240	2,280
SP5C	2,120	2,145	2,165	2,175	2,145	2,165
SP10C	2,085	2,100	2,105	2,105	2,125	2,125
SP15C	2,025	2,055	2,060	2,075	2,095	2,080
SP20C	1,960	2,000	2,015	2,030	2,035	2,025
SP25C	1,920	1,955	1,980	1,990	1,980	1,970

ตารางที่ ข.10 ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเพอร์ไลต์เพื่อใช้เป็นสารป่อชโซลาน
ธรรมชาติ โดยการผสมเพิ่ม

Sample	Unit Weight (kg/m ³)					
	Curing Time (Days)					
	3	7	14	28	60	90
CS	2,180	2,195	2,200	2,205	2,240	2,280
CSP5	2,135	2,160	2,160	2,165	2,180	2,190
CSP10	2,080	2,080	2,090	2,115	2,150	2,155
CSP15	2,030	2,055	2,060	2,060	2,110	2,111
CSP20	1,990	2,020	2,040	2,045	2,060	2,045
CSP25	1,940	1,965	1,975	1,995	2,040	2,020

ตารางที่ ข.11 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมไดอะตอมไมท์เพื่อใช้เป็นสาร
ปอชโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ทราย

Sample	Compressive Strength (ksc)					
	Curing Time (Days)					
	3	7	14	28	60	90
CS	244	283	338	366	391	408
CD5S	158	199	240	262	308	320
CD10S	114	140	197	218	254	291
CD15S	82	112	152	206	236	247
CD20S	56	95	124	183	211	232
CD25S	51	84	120	153	180	210

ตารางที่ ข.12 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมไดอะตอมไมท์เพื่อใช้เป็นสาร
ปอชโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์

Sample	Compressive Strength (ksc)					
	Curing Time (Days)					
	3	7	14	28	60	90
CS	244	283	338	366	391	408
SD5C	180	242	274	337	379	394
SD10C	143	201	225	283	300	333
SD15C	100	146	168	213	257	274
SD20C	91	136	153	187	242	265
SD25C	59	99	121	135	191	221

ตารางที่ ข.13 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมไดอะตอมไมท์เพื่อใช้เป็นสาร
ปอชโซลานธรรมชาติ โดยการผสมเพิ่ม

Sample	Compressive Strength (ksc)					
	Curing Time (Days)					
	3	7	14	28	60	90
CS	244	283	338	366	391	408
CSD5	199	225	282	290	334	352
CSD10	148	212	249	273	380	401
CSD15	119	202	243	261	347	386
CSD20	108	157	210	225	268	279
CSD25	87	136	154	170	255	275

ตารางที่ ข.14 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเพอร์ไลต์เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลาน
ธรรมชาติ โดยการแทนที่ทราย

Sample	Compressive Strength (ksc)					
	Curing Time (Days)					
	3	7	14	28	60	90
CS	244	283	338	366	391	408
CP5S	152	186	214	279	393	401
CP10S	98	134	165	196	337	338
CP15S	69	85	120	152	262	286
CP20S	44	65	91	133	222	240
CP25S	33	61	76	100	188	214

ตารางที่ ข.15 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเพอร์ไลต์เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์

Sample	Compressive Strength (ksc)					
	Curing Time (Days)					
	3	7	14	28	60	90
CS	244	283	338	366	391	408
SP5C	159	238	305	365	367	381
SP10C	137	225	255	302	319	361
SP15C	109	156	198	277	290	321
SP20C	99	134	184	215	251	295
SP25C	74	93	145	179	231	250

ตารางที่ ข.16 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเพอร์ไลต์เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ โดยการผสมเพิ่ม

Sample	Compressive Strength (ksc)					
	Curing Time (Days)					
	3	7	14	28	60	90
CS	244	283	338	366	391	408
CSP5	208	241	283	342	405	437
CSP10	159	201	248	300	423	473
CSP15	145	193	223	263	377	401
CSP20	127	163	196	234	347	350
CSP25	109	132	173	221	336	337

ตารางที่ ข.17 อัตราส่วนกำลังของมอร์ต้ารผสมไคอะตอมไมท์เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลาน
ธรรมชาติ

Sample	Strength Ratio	
	7 Days	28 Days
CS	1.00	1.00
CD5S	0.70	0.72
CD10S	0.50	0.60
CD15S	0.40	0.56
CD20S	0.34	0.50
CD25S	0.30	0.42
SD5C	0.85	0.92
SD10C	0.71	0.77
SD15C	0.51	0.58
SD20C	0.48	0.51
SD25C	0.35	0.37
CSD5	0.79	0.79
CSD10	0.75	0.75
CSD15	0.71	0.71
CSD20	0.55	0.61
CSD25	0.48	0.46

ตารางที่ ข.18 อัตราส่วนกำลังของมอร์ต้าร์ผสมเพอร์ไลต์ Type 2 เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลาน
ธรรมชาติ

Sample	Strength Ratio	
	7 Days	28 Days
CS	1	1
CP5S	0.66	0.76
CP10S	0.47	0.54
CP15S	0.30	0.42
CP20S	0.23	0.36
CP25S	0.21	0.27
SP5C	0.84	1.00
SP10C	0.79	0.83
SP15C	0.55	0.76
SP20C	0.47	0.59
SP25C	0.33	0.49
CSP5	0.85	0.94
CSP10	0.71	0.82
CSP15	0.68	0.72
CSP20	0.57	0.64
CSP25	0.47	0.60

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ราคา

ตารางที่ ก.1 ราคาคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทราย 40%

รายการ	น้ำหนัก (kg)	ถ.พ.	ปริมาตร (m ³)	น้ำหนัก ที่ปริมาตร เท่ากัน (kg)	ราคา ต่อถุง (บาท)	ราคา ต่อกก. (บาท)	ราคา ต่อก้อน (บาท)
น้ำ	0.41	1.00	0.00041	2.641	-	0.005	0.00205
ปูนซีเมนต์	1.00	3.15	0.00032	6.442	150	3.00	19.33
ทราย	1.55	2.70	0.00057	9.985	-	0.31	3.10
ไคอะตอมไมท์	1.10	1.96	0.00056	7.086	66	3.30	23.38
รวม			0.00186	26.154			
ราคาต้นทุนรวม							45.81

ตารางที่ ก.2 ราคาคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 40%

รายการ	น้ำหนัก (kg)	ถ.พ.	ปริมาตร (m ³)	น้ำหนัก ที่ปริมาตร เท่ากัน (kg)	ราคา ต่อถุง (บาท)	ราคา ต่อกก. (บาท)	ราคา ต่อก้อน (บาท)
น้ำ	0.23	1.00	0.00023	1.705	-	0.005	0.00117
ปูนซีเมนต์	0.60	3.15	0.00019	4.371	150	3.00	13.11
ทราย	2.75	2.70	0.00102	20.036	-	0.31	6.22
ไคอะตอมไมท์	0.40	1.96	0.00020	2.914	66	3.30	9.62
รวม			0.00164	29.026			
ราคาต้นทุนรวม							28.95

ตารางที่ ค.3 ราคาคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เฟอร์ไรท์ Type 1 แทนที่ทราย 40%

รายการ	น้ำหนัก (kg)	ถ.พ.	ปริมาตร (m ³)	น้ำหนัก ที่ปริมาตร เท่ากัน (kg)	ราคา ต่อถุง (บาท)	ราคา ต่อกก. (บาท)	ราคา ต่อก้อน (บาท)
น้ำ	1.04	1.00	0.00104	3.021	-	0.005	0.0052
ปูนซีเมนต์	1.00	3.15	0.00032	2.904	150	3.00	8.71
ทราย	1.55	2.70	0.00057	4.502	-	0.31	1.40
ไดอะตอมไมท์	1.10	0.50	0.00220	3.195	140	14.00	44.73
รวม			0.00413	13.622			
ราคาคำนวณรวม							54.84

ตารางที่ ค.4 ราคาคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เฟอร์ไรท์ Type 1 แทนที่ปูนซีเมนต์ 40%

รายการ	น้ำหนัก (kg)	ถ.พ.	ปริมาตร (m ³)	น้ำหนัก ที่ปริมาตร เท่ากัน (kg)	ราคา ต่อถุง (บาท)	ราคา ต่อกก. (บาท)	ราคา ต่อก้อน (บาท)
น้ำ	0.52	1.00	0.00052	2.452	-	0.005	0.00258
ปูนซีเมนต์	0.60	3.15	0.00019	2.851	150	3.00	8.55
ทราย	2.75	2.70	0.00102	13.069	-	0.31	4.06
ไดอะตอมไมท์	0.40	0.50	0.00080	1.901	140	14.00	26.61
รวม			0.00252	20.274			
ราคาคำนวณรวม							39.23

ตารางที่ ก.5 ราคาคอนกรีต กำลังอัด 300 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน ออกแบบตามมาตรฐาน ACI

รายการ	น้ำหนัก (kg)	ถ.พ.	ปริมาตร (m ³)	ราคา ต่อถุง (บาท)	ราคา ต่อกก. (บาท)	ราคา ต่อลบ.ม (บาท)	ราคา (บาท)
น้ำ	200	1.00	0.200	-	-	5	1.00
ปูนซีเมนต์ (50 kg/ถุง)	364	3.15	0.116	150	3	-	1,092.00
หิน	992	2.70	0.367	-	-	580	213.10
ปริมาตรฟองอากาศ	-	-	0.020	-	-	-	-
ปริมาตรทั้งหมด (ยกเว้นทราย)	-	-	0.703	-	-	-	-
ทราย	772	2.60	0.297	-	-	450	133.67
ปริมาตรรวม	-	-	1	-	-	-	-
น้ำหนักรวม	2328						
ราคาคำนวณรวม	-	-	-	-	-	-	1,439.76

ตารางที่ ก.6 ราคาคอนกรีต กำลังอัด 300 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน ออกแบบตามมาตรฐาน ACI และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 10%

รายการ	น้ำหนัก (kg)	ถ.พ.	ปริมาตร (m ³)	ราคา ต่อถุง (บาท)	ราคา ต่อกก. (บาท)	ราคา ต่อลบ.ม (บาท)	ราคา (บาท)
น้ำ	200	1.00	0.200	-	-	5	1.00
ปูนซีเมนต์ (50 kg/ถุง)	327.6	3.15	0.104	150	3.00	-	982.80
เถ้าลอย	992	2.70	0.367	-	-	580	213.10
หิน	36.40	2.10	0.017	-	1.00	-	36.40
ปริมาตรฟองอากาศ	-	-	0.020	-	-	-	-
ปริมาตรทั้งหมด (ยกเว้นทราย)	-	-	0.709	-	-	-	-
ทราย	757	2.60	0.291	-	-	450	131.07
ปริมาตรรวม	-	-	1	-	-	-	-
น้ำหนักรวม	2277	-	-	-	-	-	-
ราคาคำนวณรวม	-	-	-	-	-	-	1,364.36

ตารางที่ ก.7 ราคาคอนกรีต กำลังอัด 300 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน ออกแบบตามมาตรฐาน ACI และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์ 10%

รายการ	น้ำหนัก (kg)	ถ.พ.	ปริมาตร (m ³)	ราคา ต่อถุง (บาท)	ราคา ต่อกก. (บาท)	ราคา ต่อลบ.ม (บาท)	ราคา (บาท)
น้ำ	200	1.00	0.200	-	-	5	1.00
ปูนซีเมนต์ (50 kg/ถุง)	327.6	3.15	0.104	150	3.00	-	982.80
ไคอะตอมไมท์ (20 kg/ถุง)	36.40	1.96	0.019	66	3.30	-	120.12
หิน	992	2.70	0.367	-	-	580	213.10
ปริมาตรฟองอากาศ	-	-	0.020	-	-	-	-
ปริมาตรทั้งหมด (ยกเว้นทราย)	-	-	0.710	-	-	-	-
ทราย	754	2.60	0.290	-	-	450	130.51
ปริมาตรรวม	-	-	1	-	-	-	-
น้ำหนักรวม	2274	-	-	-	-	-	-
ราคาคำนวณรวม	-	-	-	-	-	-	1,447.53

ตารางที่ ก.8 ราคาคอนกรีต กำลังอัด 300 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน ออกแบบตามมาตรฐาน ACI และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลต์ Type 2 10%

รายการ	น้ำหนัก (kg)	ถ.พ.	ปริมาตร (m ³)	ราคา ต่อถุง (บาท)	ราคา ต่อกก. (บาท)	ราคา ต่อลบ.ม (บาท)	ราคา (บาท)
น้ำ	200	1.00	0.200	-	-	5	1.00
ปูนซีเมนต์ (50 kg/ถุง)	327.6	3.15	0.104	150	3.00	-	982.80
เพอร์ไลต์ Type 2 (10 kg/ถุง)	36.40	0.90	0.040	-	14.00	-	509.60
หิน	992	2.70	0.367	-	-	580	213.10
ปริมาตรฟองอากาศ	-	-	0.020	-	-	-	-
ปริมาตรทั้งหมด (ยกเว้นทราย)	-	-	0.732	-	-	-	-
ทราย	697	2.60	0.268	-	-	450	120.67
ปริมาตรรวม	-	-	1	-	-	-	-
น้ำหนักรวม	2217	-	-	-	-	-	-
ราคาคำนวณรวม	-	-	-	-	-	-	1,827.16

ตารางที่ ก.9 ราคาคอนกรีต กำลังอัด 300 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน ออกแบบตามมาตรฐาน ACI และผสมเพิ่มด้วยเถ้าลอย 10%

รายการ	น้ำหนัก (kg)	ถ.พ.	ปริมาตร (m ³)	ปริมาตร ปรับแก้ (m ³)	น้ำหนัก ปรับแก้ (kg)	ราคา ต่อถุง (บาท)	ราคา ต่อกก. (บาท)	ราคา ต่อลบ.ม (บาท)	ราคาเดิม (บาท)	ราคาใหม่ (บาท)
น้ำ	200	1.00	0.2000	0.197	196.53	-	-	5	1.00	0.98
ปูนซีเมนต์ (50 kg/ถุง)	364	3.15	0.1156	0.114	357.69	150	3.00	-	1,092.00	1,073.08
หิน	992	2.70	0.3674	0.361	974.81	-	-	580	213.10	209.47
ปริมาตรฟองอากาศ	-	-	0.0200	0.020	-	-	-	-	-	-
ปริมาตรทั้งหมด (ยกเว้นทราย)	-	-	0.7030	0.691	-	-	-	-	-	-
ทราย	772	2.60	0.2970	0.292	758.91	-	-	450	133.67	131.39
เถ้าลอย	36.40	2.10	0.0173	0.017	36.40	-	1.00	-	-	36.40
ปริมาตรรวม	-	-	1.0173	1.0	-	-	-	-	-	-
น้ำหนักรวม	2,328	-	-	-	2,324.35	-	-	-	-	-
ราคาต้นทุนรวม	-	-	-	-	-	-	-	-	1,439.76	1,451.31

ตารางที่ ก.10 ราคาคอนกรีต กำลังอัด 300 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน ออกแบบตามมาตรฐาน ACI และผสมเพิ่มด้วยไคอะตอมไมท์ 10%

รายการ	น้ำหนัก (kg)	ถ.พ.	ปริมาตร (m ³)	ปริมาตร ปรับแก้ (m ³)	น้ำหนัก ปรับแก้ (kg)	ราคา ต่อถุง (บาท)	ราคา ต่อกก. (บาท)	ราคา ต่อลบ.ม (บาท)	ราคาเดิม (บาท)	ราคาใหม่ (บาท)
น้ำ	200	1.00	0.2000	0.196	196.29	-	-	5	1.00	0.98
ปูนซีเมนต์ (50 kg/ถุง)	364	3.15	0.1156	0.113	357.24	150	3.00	-	1,092.00	1,071.72
หิน	992	2.70	0.3674	0.361	973.58	-	-	580	213.10	209.21
ปริมาตรฟองอากาศ	-	-	0.0200	0.020		-	-	-	-	-
ปริมาตรทั้งหมด (ยกเว้นทราย)	-	-	0.7030	0.690		-	-	-	-	-
ทราย	772	2.60	0.2970	0.292	757.95	-	-	450	133.67	131.23
ไคอะตอมไมท์	36.40	1.96	0.0186	0.018	36.40	66	3.30	-	-	120.12
ปริมาตรรวม	-	-	1.0186	1.000	-	-	-	-	-	-
น้ำหนักรวม	2,328	-	-	-	2,321.46					
ราคาดำเนินทุนรวม	-	-	-			-	-	-	1,439.76	1,533.26

ตารางที่ ก.11 ราคาคอนกรีต กำลังอัด 300 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน ออกแบบตามมาตรฐาน ACI และผสมเพิ่มด้วยเพอร์ไลต์ Type 2 10%

รายการ	น้ำหนัก (kg)	ถ.พ.	ปริมาตร (m ³)	ปริมาตร ปรับแก้ (m ³)	น้ำหนัก ปรับแก้ (kg)	ราคา ต่อถุง (บาท)	ราคา ต่อกก. (บาท)	ราคา ต่อลบ.ม (บาท)	ราคาเดิม (บาท)	ราคาใหม่ (บาท)
น้ำ	200	1.00	0.2000	0.192	192.08	-	-	5	1.00	0.96
ปูนซีเมนต์ (50 kg/ถุง)	364	3.15	0.1156	0.111	349.59	150	3.00	-	1,092.00	1,048.76
หิน	992	2.70	0.3674	0.353	952.72	-	-	580	213.10	204.98
ปริมาตรฟองอากาศ	-	-	0.0200	0.019		-	-	-	-	-
ปริมาตรทั้งหมด (ยกเว้นทราย)	-	-	0.7030	0.676		-	-	-	-	-
ทราย	772	2.60	0.2970	0.286	741.71	-	-	450	133.67	128.58
เพอร์ไลต์ Type 2	36.40	0.90	0.0396	0.038	36.40	-	14.00	-	-	509.60
ปริมาตรรวม	-	-	1.0396	1	-	-	-	-	-	-
น้ำหนักรวม	2,328	-	-	-	2,272.50					
ราคาต้นทุนรวม	-	-	-			-	-	-	1,439.76	1,892.87

ภาคผนวก ง

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

รายการอ้างอิง

- กรมทรัพยากรธรณี. (2548). เพอร์ไลต์. [ออนไลน์]. ได้จาก: [http://www.dmr.go.th/Interest /Data /TI2dataD.htm](http://www.dmr.go.th/Interest/Data/TI2dataD.htm).
- คม บัวคลี และรังสรรค์ รังสิมาวงศ์. (2540). การพัฒนามอร์ต้าร์มวลเบาโดยใช้เพอร์ไลต์. เอกสารงานวิจัย. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- จันทนา สุขมานนท์. (2550). INSEE Concrete Handbook. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: บริษัท เซอร์คัส เพรส จำกัด.
- จิตรกร ตังอนุสรณ์สุข และคณะ. (2548). ผลกระทบของเพอร์ไลต์ต่อการซึมผ่านอากาศ และปริมาณช่องว่างอากาศภายในซีเมนต์มอร์ต้าร์. ปรินูญานิพนธ์. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- จิรภัทร ขำญาติ. (2546). เทคโนโลยีไทย. Engineering Today. 1 (3): 17.
- ชัชวาล เศรษฐบุตร. (2536). คอนกรีตเทคโนโลยี. บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด
- ชัชวาล เศรษฐบุตร. (2551). ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน. บริษัทเอสซีจี ซีเมนต์ จำกัด ในธุรกิจซีเมนต์ เครือซีเมนต์ไทย (SCG CEMENT).
- ณรงค์ศักดิ์ นันทคำภีรา และคณะ. (2547). หินอัลนิ. [ออนไลน์]. ได้จาก: [http://www.soil.civil.rmut.ac.th /rock/index1.html](http://www.soil.civil.rmut.ac.th/rock/index1.html).
- ธีรวัฒน์ ลินศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2548). ผลกระทบของขนาดอนุภาคและรูปร่างเม็ดผ่านหินต่อความพรุนและการซึมผ่านอากาศของเพสต์. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1. (หน้า CON22-CON29). กรุงเทพฯ. สมาคมคอนกรีตไทย.
- บุรฉัตร ฉัตรวิระ และ ทวีศักดิ์ คงทรัพย์. (2545). ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้ากลบดำจากโรงสีข้าว. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 25 ฉบับที่ 4 (ตุลาคม-ธันวาคม).
- ประพัทธ์ กรังพานิชย์. (2540). การนำกากแร่สังกะสีและวัสดุพูนเบาเพอร์ไลต์มาผลิตเป็นคอนกรีตเบา. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย.

- ปริญญา จินดาประเสริฐ และอินทรชัย หอวิจิตร. (2548). **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ**. สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อชนบท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. (2543). **ฟิสิกส์ราชมงคล ศัพท์ชีวะ**. [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.electron.rmutphysics.com/bio-glossary>.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2541). **ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ**. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. ฉบับที่ 2411 (พ.ศ. 2541). สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม. (มอก.1505-2541.)
- วินิต ช่อวิเชียร. (2544). **คอนกรีตเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ.
- ศิริรัตน์ รัตนจันทร์. (2543). **การศึกษาเบื้องต้นในการเตรียมวัสดุเพื่อผสมทำคอนกรีตที่มีน้ำหนักเบาจากดินที่มีอยู่ในท้องถิ่น**. รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี [สสวท.]. (2550). **ซากดึกดำบรรพ์**. [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.ipst.ac.th/science/index.shtml>.
- สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน กลุ่มวิศวกรรมและความปลอดภัย. (2546). **เพอร์ไลต์**. [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.dpim.go.th/ppr/title.php?tid=000001074149948>.
- เสรีวัฒน์ สมนิทร์ปัญญา. (2538). **โลกและหิน**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ สุริยวิทยาสาน.
- อนนท์ ป้อมประสิทธิ์. (2545). **กรมวิทยาศาสตร์บริการ ศูนย์ความรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. **ปอซโซลาน**. [ออนไลน์]. ได้จาก: http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_11_2545_pozzalan.pdf.
- Aydin, A.C. and Gul, R. (2007). **Influence of Volcanic Originated Natural Materials as Additives on The Setting Time and Some Mechanical Properties of Concrete**. Construction and Building Materials. 21. p.1277-1281.
- American Concrete Institute. (1999). **Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete**. ACI Manual of Concrete Practice. (ACI 213 R-87, Reapproved 1999)
- American Concrete Institute. (2000). **State of The Art Report on High-Strength Concrete**. ACI Manual of Concrete Practice. Part 2. Michigan. (ACI 363 R-92, Reapproved 1997)
- American Concrete Institute. (2000). **Use of Fly Ash in Concrete**. ACI Manual of Concrete Practice. Part 1. Michigan. (ACI 232.2 R-96)
- American Society for Testing and Materials. (1991). **Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 618-91).

- American Society for Testing and Materials. (1998). **Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 311-98).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.01. (ASTM C 109/ C 109 M-99).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregates**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 128-97).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.01. (ASTM C 138/ C 138 M-01a).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.02. (ASTM C 204).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 40-99).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 136-96a).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.01. (ASTM C 204).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregates**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.02. (ASTM C 29/ C 29 M-97a).
- Pekmezci, B.Y. and Akyuřz, S. (2004). **Optimum Usage of A Natural Pozzolan for The Maximum Compressive Strength of Concrete**. Cement and Concrete Research. 34. p.2175-2179.

- Fragoulisa, D., Stamatakisb, M.G., Chaniotakis E. and Columbusb, G. (2004). **Characterization of Lightweight Aggregates Produced with Diatomite Rocks Originating From Greece**. Materials Characterization. 53. p.307-316.
- Topcu, I.B. and Isikdag, B. (2007). **Effect of Expanded Perlite Aggregate on The Properties of Lightweight Concrete**. Journal of Materials Processing Technology PROTEC-11355; No. of Pages 5.
- Kedsarin Pimraksa and Prinya Chindaprasirt. (2008). **Lightweight Bricks Made of Diatomaceous Earth, Lime and Gypsum**. Ceramics International. CERI-2954; No of Pages 8.
- Shannag, M.J. and Shania, H.A. (2003). **Sulfates Resistant of High-performance Concrete**. Cement and Concrete Composites 25:363-369.
- Demirboga, R. and Gul, R. (2003). **Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures**. Energy and Buildings. 35. p.1155-1159.
- Demirboga, R., Orung, I. and Gul, R. (2001). **Effects of Expanded Perlite Aggregate and Mineral Admixtures on The Compressive Strength of Low-Density Concretes**. Cement and Concrete Research. 31. p.1627-1632.



ผลกระทบของซีโอไลต์ต่อโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์เพสต์ผสม

THE EFFECT OF ZEOLITE ON MICROSTRUCTURE OF BLENDED CEMENT PASTE

ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ (Theerawat Sinsiri)¹ชววิทย์ นาทีย (Chuwit Napia)²ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (Saksith Pantawee)³¹อาจารย์, นักศึกษาปริญญาเอก, หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้าง, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี,นครราชสีมา, Email address : sinsiri@sut.ac.th

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, นครราชสีมา

Email address : sacred13@hotmail.com

บทคัดย่อ : บทความนี้นำเสนอผลกระทบของซีโอไลต์ต่อโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์เพสต์ผสม โดยนำซีโอไลต์จากการสังเคราะห์ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้มีค่าเท่ากับ 0.35 ศึกษาผลกระทบของซีโอไลต์ต่อปฏิกิริยาปอซโซลานในเพสต์ โดยวิธี Thermal Diffraction Gravity Analysis (TGA/DTA), X-Ray Diffraction Analysis (XRD), ถ่ายภาพขยายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และทดสอบหาความพรุนโดยวิธี Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)

ผลการทดสอบพบว่าปริมาณการแทนที่ของซีโอไลต์มีผลกระทบที่สำคัญต่อปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลต์ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงและปฏิกิริยาปอซโซลาน เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น และผลของภาพขยายพื้นผิวของตัวอย่างด้วย SEM พบว่าเพสต์ที่ผสมซีโอไลต์โครงสร้างของเพสต์มีความหนาแน่นขึ้น การแทนที่ซีโอไลต์ในเพสต์มีผลกระทบที่สำคัญต่อปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงคาปิลลารีของเพสต์ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลต์ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดของเพสต์เพิ่มขึ้นแต่ขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลง และโพรงคาปิลลารีขนาดใหญ่มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่โพรงคาปิลลารีขนาดกลางเพิ่มขึ้น เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลต์

ABSTRACT : This paper presents the effect of zeolite on microstructure of hardened blended cement pastes. Synthesise zeolite was used to partially replace Portland cement type I at the rate of 0, 20, and 40% by weight of binder. The water to binder ratio (W/B) of 0.35 was used for all the blended cement paste mixtures. XRD and DTA were used to investigate the pozzolanic reaction of blended cement paste and fractured surface of blended cement paste was studied by SEM. The pore size distribution of blended cement paste was studied by MIP.

Test results indicated that the pozzolanic reaction of blended cement paste was significantly affected by the replacement of zeolite. The Ca(OH)_2 of blended cement paste decreased with an increase in zeolite content at the longer curing. SEM results revealed that the pastes with zeolite became denser. The porosity and pore size of blended cement paste was significantly affected by the replacement of zeolite. The replacement of Portland cement by zeolite increased the total porosity but decreased the average pore size of the paste. The large capillary porosity trended to decreased and medium capillary porosity increased as a result of the addition of zeolite.

KEYWORDS : Zeolite, Microstructure (XRD, TGA, SEM,), Porosity (MIP), Blend cement paste

1. บทนำ

ซีโอไลต์ (Zeolite) ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง เป็นรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-30 อังสตรอม (1 อังสตรอมเท่ากับ 1×10^{-10} เมตร) ปัจจุบันนิยมนำธาตุชนิดนี้มาใช้เป็นส่วนประกอบของผงซักฟอก และใช้ในการปรับปรุงปัญหาเกี่ยวกับมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม เช่น เป็นตัวดูดซับมลพิษทางอากาศ และใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

นอกจากนี้ได้มีการนำซีโอไลต์มาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านคอนกรีตมากขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์เป็นสารที่องค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยสารซิลิกา และสารอลูมินา เป็นหลัก และมีขนาดอนุภาคเล็ก มีรูพรุนสูง จึงน่าจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี โดยเฉพาะในประเทศจีนมีการนำซีโอไลต์จากธรรมชาติมาประยุกต์ใช้กับงานคอนกรีต มากมาย เช่น มาทำเป็นคอนกรีตมวลเบา ทำเป็นสารผสมเพิ่มลดการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลในคอนกรีต ลดปัญหาการเกิดการแตกร้าว ลดการซึมผ่าน เพิ่มความทนทาน เพิ่มกำลัง ทำเป็นวัสดุปอซโซลาน เป็นต้น [1, 2, 3, 4]

ผู้วิจัยได้ศึกษาศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของซีเมนต์พิเศษผสมซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำซีโอไลต์มาเป็นวัสดุปอซโซลาน เพื่อนำมาทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีต [5] ดังนั้นในบทความนี้จึงมีการศึกษาเพิ่มเติม โดยนำเสนอผลกระทบของซีโอไลต์โครงสร้างระดับอนุภาคของเฟส เช่น ปริมาตรโพรง และปฏิกิริยาปอซโซลาน เพื่อยืนยันว่าซีโอไลต์มีความเป็นปอซโซลาน สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย

ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150
ซีโอไลต์สังเคราะห์ จากบริษัทเอกชนในจังหวัดชลบุรี ใช้สัญลักษณ์คือ Ze
น้ำ ใช้น้ำประปา

2.2 อัตราส่วนผสม

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถูกแทนที่ด้วยซีโอไลต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 หล่อตัวอย่างก้อนเพสต์รูปลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม ตามมาตรฐาน ASTM C 109 และคลุมด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ หลังจากหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมงจึงถอดแบบออก และบ่มโดยการนำไปแช่น้ำจนท่วมตัวอย่างเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำที่อุณหภูมิห้อง ตามเวลาที่กำหนด นำไปทดสอบที่อายุ 28 วัน

3. วิธีการทดสอบ

3.1 ทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์และซีโอไลต์

3.1.1. การทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซีโอไลต์ โดยใช้ขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิแอร์ (Le Chatelier Flask) ตาม ASTM C 188

3.1.2 ถ่ายภาพขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซีโอไลต์ ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

3.1.3 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซีโอไลต์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence

3.1.4 หากการกระจายขนาดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซีโอไลต์ โดยใช้เครื่อง Mastersizer

3.2 ทดสอบคุณสมบัติของเฟส

นำตัวอย่างที่อายุครบ 28 วันจากการบ่มในน้ำมาทำให้แห้ง แล้วทุบตัวอย่างรูปลูกบาศก์ ให้แตกเป็นชิ้นเล็กๆขนาดประมาณ 10×10 มม.² นำชิ้นตัวอย่างไปแช่สาร Acetone ในโถแก้วที่ปิดมิดชิด เป็นเวลา 7 วัน เพื่อหยุดปฏิกิริยา หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างมาทำให้แห้งใช้ตู้อบที่อุณหภูมิ 80-100 องศา

เซลล์ซีต เป็นเวลา 30 นาที นำเข้าเครื่องบดละเอียด ที่ความเร็ว 950 รอบ/นาที เป็นเวลา 2 นาที แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (150ไมครอน) นำตัวอย่างไปทดสอบ XRD และ TGA, DTA เพื่อวิเคราะห์หาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ อีกส่วนหนึ่งหุบก้อนตัวอย่างให้มีขนาดประมาณ 2×2 มม.² นำไปทดสอบปริมาณโพรงทั้งหมด การกระจายขนาดโพรง โดย MIP และ หุบให้เป็นแผ่นขนาด 1×1 ซม.²หนา 0.5 ซม. นำไปถ่ายภาพขยายของเพสต์ด้วยเครื่อง SEM

3.3 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้

PC = ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ZE = ซีโอไลต์

PC100 = เพสต์ที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

PZE20 = เพสต์ผสมด้วยซีโอไลต์ในอัตราทดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

PZE40 = เพสต์ผสมด้วยซีโอไลต์ในอัตราทดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

4.1 คุณสมบัติของวัสดุ

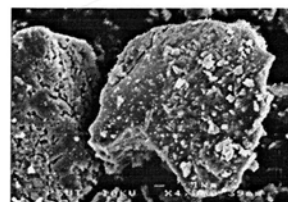
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ต

แลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอไลต์

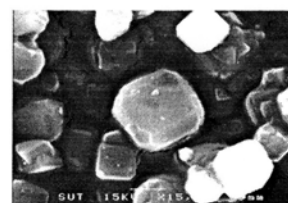
ตารางที่ 1 แสดงความถ่วงจำเพาะและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอไลต์ และจากการที่นำตัวอย่างไปทำการถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม แต่มีเนื้อแน่น ดังแสดงในรูปที่ 1 ก. และเมื่อพิจารณารูปที่ 1 ข พบว่าซีโอไลต์มีพื้นผิวเรียบ รูปร่างมีลักษณะเป็น 6 เหลี่ยม มีขนาด อนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 2.34 ไมครอน ขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 13.60 ไมครอน โดยกราฟแสดงการกระจายขนาดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอไลต์ด้วยเครื่อง Mastersizer แสดงในรูปที่ 2

ตารางที่ 1 ความถ่วงจำเพาะและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอไลต์

Sample	Specific Gravity	Mean Particle Size d_{50} (micron)
PC	3.15	13.60
Ze	1.87	2.34

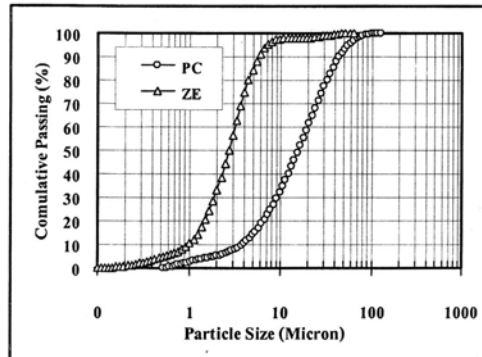


ก) ภาพถ่ายขยาย 4,000 เท่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1



ข) ภาพถ่ายขยาย 15,000 เท่าของซีโอไลต์

รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายของวัสดุโดย SEM



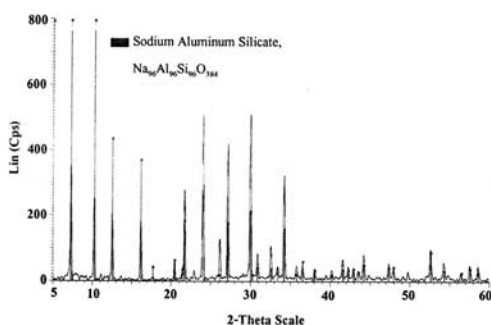
รูปที่ 2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอไลต์

4.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอไลต์

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซีโอไลต์ด้วยเครื่อง XRF พบว่าซีโอไลต์มีออกไซด์ของซิลิกา และ อลูมินา เมื่อนำซีโอไลต์มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3 พบว่า Pattern ที่ได้สามารถระบุได้ว่าเป็นซีโอไลต์ชนิด A ซึ่งมีชื่อเรียกว่า Sodium Aluminum Silicate โดยมุมของการเลี้ยวเบนที่ใช้คือ 2θ หรือประมาณ $0-60^\circ$ ซึ่ง Zeolite A มีสูตรทางโครงสร้างทางเคมีดังนี้ $\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{96}\text{O}_{384}$

ตารางที่ 2 องค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอไลต์

Chemical Composition (%)	Portland Cement Type I (PC1)	Zeolite (Ze)
SiO_2	20.9	67.08
Al_2O_3	4.76	21.12
Fe_2O_3	3.41	0.03
CaO	65.41	0.18
MgO	1.25	0.08
K_2O	0.35	2.87
LOI	0.96	6.27



รูปที่ 3 การหักเหของรังสีเอ็กซ์เรย์ ของซีโอไลต์

4.2 คุณสมบัติของพาสต์

4.2.1 ผล การวิเคราะห์ปฏิกิริยาและการเปลี่ยนแปลงต่างๆของพาสต์เมื่อได้รับความร้อน (Thermal Analysis in Pastes)

Differential Thermal Analysis (DTA) เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาต่างๆเมื่อพาสต์ได้รับความร้อน

โดยปฏิกิริยาที่สามารถตรวจพบ (Detect) ได้โดยเทคนิคนี้จะต้องมีการเปลี่ยนแปลง Enthalpy ระหว่างเกิดปฏิกิริยา กล่าวคือ Endothermic Reaction คือ ปฏิกิริยาที่ดูดพลังงานความร้อนจากภายนอก หรือ Exothermic Reaction คือ ปฏิกิริยาที่คายความร้อนออกมาภายนอก ปฏิกิริยาทั้งสองแบบจะมีผลทำให้อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมเกิดการเปลี่ยนแปลง หลักการทำงานของเครื่อง DTA จะใช้พื้นฐานการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างเกิดปฏิกิริยาในการวิเคราะห์ หลักการทำงานของเครื่องจะวัดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวอย่างและวัสดุเปรียบเทียบกับ (Inert Reference Materials, ฝง Alumina) โดยที่ทั้งตัวอย่าง และ Reference จะได้รับความร้อนในสภาวะแบบเดียวกัน และจะบันทึกผลอย่างต่อเนื่องออกมาแสดงในรูปที่ 4

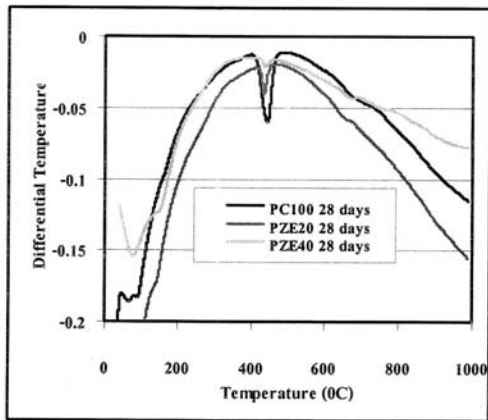
Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงของพาสต์ตัวอย่าง ระหว่างปฏิกิริยาเมื่อได้รับความร้อน เช่น ปฏิกิริยาแตกตัวของวัสดุ (Decomposition) ปฏิกิริยาการระเหยของน้ำในพาสต์ทั้ง Free และ Chemical Water เป็นต้น หลักการทำงานของเครื่อง TGA จะทำการวิเคราะห์โดยใส่ตัวอย่างในตาชั่งขนาดเล็กที่มีความละเอียดสูงมาก (Microbalance) ซึ่งจะทำให้การบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างอย่างต่อเนื่องในลักษณะกราฟเมื่อตัวอย่างได้รับความร้อน น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงระหว่างปฏิกิริยาจะสามารถอ่านได้โดยตรงจากกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 5

รูปที่ 4 และ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ DTA และ TGA ของพาสต์ PC100, PZE20, และ PZE40 ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับพิจารณาการสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิระหว่าง 450°C และ 580°C [6, 7, 8] ซึ่งจะสลายตัวในรูปแคลเซียมออกไซด์กับน้ำ ดังสมการที่ 1

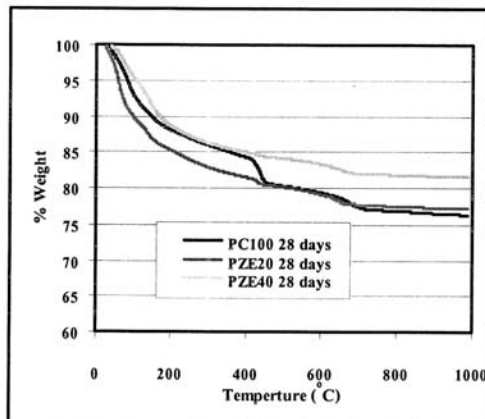


จากผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 4 และ 5 พบว่าการสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ลดลงเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลต์ (PZE20, PZE40) โดยเปรียบเทียบกับพาสต์ที่ผสมปูนซีเมนต์ล้วน (PC100) เมื่อแทนที่ซีโอไลต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงด้วย นั้นแสดงว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ก็ลดลงด้วยในพาสต์ที่ผสมซีเมนต์ล้วนปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ส่วนในพาสต์ผสมซี

โอไลต์ ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์และปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซีโอไลต์



รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาต่างๆเมื่อเพสต์ได้รับความร้อน (DTA)



รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักที่ลดลงของเพสต์ เมื่อเพสต์ได้รับความร้อน (TGA)

4.2.2 ผลกระทบของซีโอไลต์ต่อปริมาตรโพรงของเพสต์

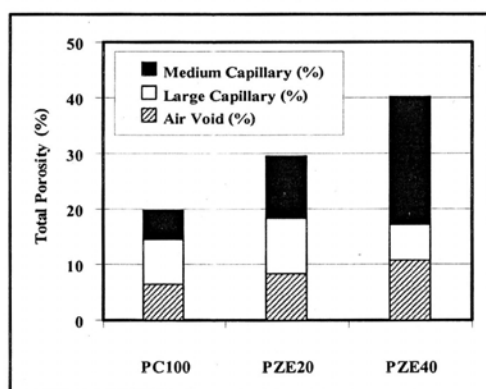
ตารางที่ 3 แสดงปริมาณของโพรงชนิดต่างๆ, ขนาดโพรงเฉลี่ย, และพื้นที่โพรงทั้งหมดของเพสต์ PC100, เพสต์ PZE20 และ PZE40 ที่อายุ 28 วัน ส่วนรูปที่ 6 แสดงปริมาณโพรงทั้งหมดของเพสต์ PC100, PZE20 และ PZE40 ที่อายุ 28 วัน จากผลการทดลองพบว่าปริมาณโพรงทั้งหมด (Total Porosity) และพื้นที่โพรงทั้งหมด (Total Pore Area) มีปริมาณที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่ซีโอไลต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจาก

คุณสมบัติของซีโอไลต์มีรูพรุนหรือโพรงขนาดเล็กเชื่อมต่อกัน ส่งผลให้ปริมาณโพรง และพื้นที่โพรงสูงขึ้น แต่ถ้าพิจารณาขนาดเฉลี่ยของโพรง (Average Pore) พบว่ามีขนาดเล็กลง เมื่อมีการแทนที่ซีโอไลต์ในปริมาณที่มากขึ้น เป็นเพราะว่าขนาดอนุภาคของซีโอไลต์มีขนาดเล็กมาก (ขนาดเฉลี่ยประมาณ 2.34 ไมครอน) เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 13.60 ไมครอน ขนาดที่เล็กของซีโอไลต์ไปแทรกตัวระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้ช่องว่างลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของโพรงคาปิลลารีขนาดกลาง (Medium Capillary, 10,000-50 nm) มีปริมาณที่มากขึ้น นั่นแสดงว่าเพสต์ที่ใส่ซีโอไลต์ มีโพรงขนาดเล็กเพิ่มขึ้นในปริมาณที่มาก นอกเหนือจากขนาดอนุภาคที่เล็กของซีโอไลต์ อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซีโอไลต์ด้วย แต่ในการนำเสนอครั้งนี้ยังไม่มีการยืนยันชัดเจน

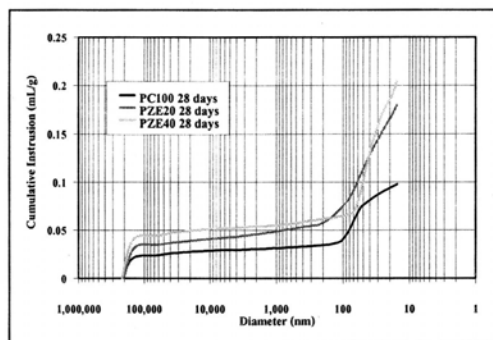
รูปที่ 7 แสดงขนาดโพรงและการสะสมของปริมาตรโพรงในเพสต์ PC100, PZE20 และ PZE40 ที่อายุ 28 วัน และรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงในเพสต์ PC100, PZE20, และ PZE40 ที่อายุ 28 วัน จากกราฟรูปที่ 7 เราพบว่า เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลต์ การกระจายขนาดโพรงของเพสต์ที่ผสมซีโอไลต์ มีความละเอียดกว่าซีเมนต์เพสต์ล้วน สอดคล้องกับรูปที่ 8 พบว่าเพสต์ PZE20 และ PZE40 มีขนาดโพรงคาปิลลารีลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเพสต์ PC100 ที่อายุ 28 วัน จุดยอดโพรงคาปิลลารีของเพสต์ PZE20 และ PZE40 มีค่าเท่ากับ 45.20 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.0146 มล/ก และ 36.20 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.0264 มล/ก ตามลำดับ ในขณะที่เพสต์ PC100 มีค่าเท่ากับ 68.10 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.015 มล/ก ในช่วงอายุต้นกล่าวได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลัก ส่วนปฏิกิริยาปอซโซลานิกจากเถ้าถ่านหินเกิดขึ้นน้อย ดังนั้นเมื่อมีการแทนที่ซีโอไลต์ในปริมาณและขนาดที่เหมาะสม จะช่วยลดขนาดโพรงคาปิลลารีลงได้ โดยอาศัยอนุภาคขนาดเล็กช่วยอุดโพรงในเพสต์

ตารางที่ 3 แสดงปริมาณของโพรงชนิดต่างๆ, ขนาดโพรงเฉลี่ย, และพื้นที่โพรงทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์, เพสต์ PZE20 และ PZE40 ที่อายุ 28 วัน

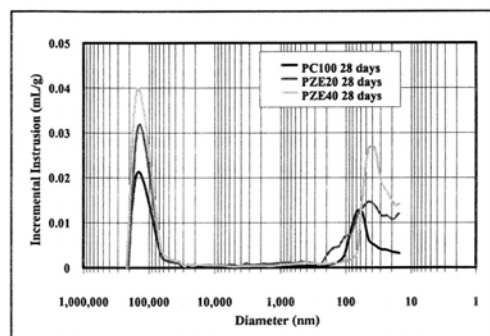
	PC100	PZE20	PZE40
Air Void (%) (> 10,000 nm)	6.31	8.32	10.75
Large Capillary (%) (10,000-50 nm)	8.27	9.98	6.48
Medium Capillary (%) (5-10 nm)	5.24	11.26	23.03
Total Porosity (%)	19.83	29.56	40.26
Average Pore (nm)	47.90	44.00	40.25
Total Pore Area (m ² /g)	8.80	17.14	25.90



รูปที่ 6 ปริมาณโพรงทั้งหมดของเพสต์ PC100, PZE20 และ PZE40 ที่อายุ 28 วัน



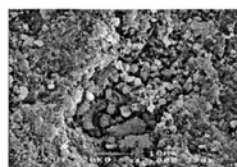
รูปที่ 7 ขนาดโพรงและการสะสมของปริมาตรโพรงในเพสต์ PC100, PZE20 และ PZE40 ที่อายุ 28 วัน



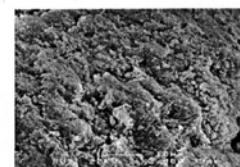
รูปที่ 8 ขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงในเพสต์ PC100 เพสต์ PZE20 และ PZE40 ที่อายุ 28 วัน

4.2.3 การวิเคราะห์ Fracture Surface ของเพสต์ โดย Scanning Electron Microscope (SEM)

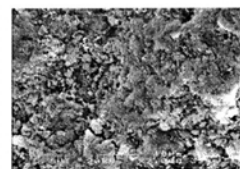
การพัฒนาโครงสร้างขนาดเล็กของเพสต์ PC100, PZE20, และ PCZE40 สังเกตจากภาพขยายโดยกล้อง SEM ที่อายุ 28 วัน แสดงในรูปที่ 9ก, ข และ คตามลำดับ จากรูปพบว่าเพสต์ PC100 มีความพรุนและช่องว่างมาก พิจารณาเพสต์ PZE20 และ PZE40 พบว่าเพสต์มีความแน่นขึ้น สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.2.2 กล่าวคือมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอโลด ทำให้ขนาดโพรงลดลง ทำให้เพสต์แน่นขึ้น อาจเป็นผลของสารประกอบเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานบางส่วน นอกจากนี้อุณหภูมิของซีโอโลดบางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะในเพสต์ที่มีการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณมาก (PZE40) ทำหน้าที่อุดช่องว่างในเพสต์ ส่งผลให้โครงสร้างเพสต์แน่นขึ้น



ก. ภาพขยายของเพสต์ PC100



ข. ภาพขยายของเพสต์ PZE20



ค. ภาพขยายของเพสต์ PZE40

รูปที่ 9 ภาพถ่ายขยาย Fracture Surface ในเพสต์ PC100, PZE20 และ PZE40 ที่อายุ 28 วัน

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาผลของปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยเปรียบเทียบกับผลที่ผสมปูนซีเมนต์ล้วน
2. การแทนที่ซีโอไลต์ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นในซีเมนต์เพสต์ ทำให้ปริมาณโพรงทั้งหมดสูงขึ้น แต่ขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลง
3. การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลต์ ทำให้ขนาดโพรงลดลง ส่งผลให้เพสต์มีโครงสร้างที่แน่นขึ้น อาจเป็นผลของสารประกอบเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานบางส่วน นอกจากนี้อนุภาคของซีโอไลต์บางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะในเพสต์ที่มีการแทนที่เกินอัตราส่วนในปริมาณมากทำหน้าที่อุดช่องว่างในเพสต์

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความสะดวกด้านอุปกรณ์เครื่องมือ และห้องปฏิบัติการ ขอขอบคุณ นายนิรันดร์ กมลสถิตกุล และ นายราชันต์ ปริลระอง นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ได้จัดเตรียมวัสดุ และทำการทดสอบในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Feng, N.-Q., Xing, F. and Leng, F.-G. 2000. Zeolite Ceramsite Cellular Concrete. Magazine of Concrete Research, 52 (2): 117-122.
- [2] Feng, N.-Q. and Peng, G.-F. 2005. Applications of Natural Zeolite to Construction and Building Materials in China. Construction and Building Materials, 19: 579-584.
- [3] Quanlin, N. and Naiqian, F. 2005 Effect of Modified Zeolite on Expansion of Alkaline Silica Reaction. Cement and Concrete Research, 35 (9): 1784-1788.
- [4] Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C. and Lin, Z. S. 1999. A Study on the Hydration Rate of Natural Zeolite Blended Cement Paste. Construction and Building Materials, 13: 427-432.
- [5] ชีรวัฒน์ สินศิริ, "ผลกระทบของซีโอไลต์ต่อคุณสมบัติของเพสต์และมอร์ตาร์", การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 2, 25-27 ตุลาคม 2549, อุตรธานี, หน้า MAT12-MAT17.

- [6] El-Jazairi, B. and Illston, J.M. 1977. A Simultaneous Semi-Isothermal Method of Thermo-gravimetry and Derivative Thermogravimetry, and Its Application to Cement Pastes. Cement and Concrete Research, 7:247-258.
- [7] El-Jazairi, B. and Illston, J.M. 1980. The Hydration of Cement Paste using the Semi-Isothermal Method of Derivative Thermogravimetry, Cement and Concrete, 10: 361-366.
- [8] Wang, K.S., Lin, K.L., Lee, T.Y. and Tzeng, B.Y. 2004. The Hydration Characteristics when C_2S is Present in MSWI Fly Ash Slag. Cement and Concrete Research, 26: 323-330.



ชื่อ – สกุล : นายชีรวัฒน์ สินศิริ

การศึกษา

พ.ศ. 2534 : ปริญญาตรี (วศ.บ. วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยขอนแก่น

พ.ศ. 2537 : ปริญญาโท (วศ.ม. วิศวกรรมโครงสร้าง) มหาวิทยาลัย

ขอนแก่น

พ.ศ. 2549 : ปริญญาเอก (วศ.ด. วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2541 – ปัจจุบัน : อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีสุรนารี



ชื่อ – สกุล : นายชูวิทย์ นาพีย

การศึกษา

พ.ศ. 2539 : ปริญญาตรี (วศ.บ. วิศวกรรมขนส่ง) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

สุรนารี

พ.ศ. 2543 : ปริญญาโท (วศ.ม. วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยรังสิต

พ.ศ. 2549 – ปัจจุบัน : กำลังศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรม

โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2544 – ปัจจุบัน : อาจารย์คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ : ผู้อำนวยการกองนโยบายและ

แผน



ชื่อ-สกุล นายศักดิ์สิทธิ์ พันทวี

การศึกษา

พ.ศ. 2546 ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
(วศ.บ.โยธา) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาค
ตะวันออกเฉียงเหนือ

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2541 – ปัจจุบัน เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคอนกรีต ,ห้องปฏิบัติการ
โครงสร้าง ณ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาค
ตะวันออกเฉียงเหนือ

การใช้เพอร์ไลต์ในงานคอนกรีตมวลเบา USAGE OF PERLITE IN LIGHT-WEIGHT CONCRETE

ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ (Theerawat Sinsiri)¹

ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (Saksith Pantawee)²

¹อาจารย์, หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้าง, สาขาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา

<sinsiri@sut.ac.th>

²นักศึกษาปริญญาโท, สาขาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา <sacred13@hotmail.com>

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการใช้เพอร์ไลต์ (perlite) ในงานคอนกรีตมวลเบา ซึ่งเพอร์ไลต์ที่ใช้เป็นเพอร์ไลต์ Type III ที่มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก มีอนุภาคขนาดเล็ก มีรูพรุนสูง และมีน้ำหนักเบา โดยการศึกษาจะนำเพอร์ไลต์แทนที่ทราย และแทนที่ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมการไหลแก่ที่ร้อยละ 105–115 และเปรียบเทียบกำลังอัดและหน่วยน้ำหนักกับมอร์ตาร์ควบคุม จากการวิจัยพบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของเพอร์ไลต์เท่ากับ 0.50 เมื่อใช้เพอร์ไลต์แทนที่วัสดุประสานจะทำให้ความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจึงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นด้วย และการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเพอร์ไลต์จะแปรผกผันกับปริมาณของเพอร์ไลต์ กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ซึ่งทำให้ค่ากำลังอัดลดลง อย่างไรก็ตามจากการวิจัยจะได้คอนกรีตมวลเบาที่อายุการบ่ม 28 วัน โดยเมื่อแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 50 แทนที่ซีเมนต์มีค่ากำลังอัด 101 ksc ค่าหน่วยน้ำหนัก 1,460 kg/m³ และเมื่อแทนที่ทรายค่ากำลังอัดเท่ากับ 59 ksc และมีค่าหน่วยน้ำหนักน้อยที่สุดเท่ากับ 990 kg/m³

ABSTRACT : This paper aims to studies the usage of perlite in lightweight concrete. The perlite in this study is perlite type III, is a type of mineralogical material containing large quantities of reactive SiO₂ and Al₂O₃, small particles, high porosity and lightweight. In the study, used the perlite to replace sand and cement at ratio of 0, 10, 20, 30, 40 and 50% by weight of binder. Comparison of the compressive strength and density of perlite mortar was performed with control mortar at in range of 105 to 115. The results revealed that the perlite specific gravity was 0.50, the increasing quantity of perlite were direct effected to increase setting time and decrease compressive strength. The use of perlite of 50% cement replacement at 28 days obtained compressive strength and density were 101 ksc and 1,460 kg/m³ respectively. And using perlite of 50% sand replacement gave the compressive strength and density were 59 ksc and 990 kg/m³ respectively.

KEYWORDS : Perlite, Pozzolan, Lightweight concrete

1. บทนำ

ในปัจจุบันคอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างโดยทั่วไปมีส่วนประกอบหลักคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุมวลรวมละเอียด (ทราย) วัสดุมวลรวมหยาบ (หินหรือกรวด) และน้ำ ซึ่งทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กลายเป็นซีเมนต์เพสต์ซึ่งจะยึดเกาะวัสดุมวลรวมเข้าไว้ด้วยกันเป็นคอนกรีต ในที่สุด คอนกรีตปกติจะมีหน่วยน้ำหนักประมาณ 2,300 – 2,400 kg/m³ ซึ่งถือว่ามากพอสมควรในการที่โครงสร้างต้องสูญเสียกำลังส่วนหนึ่งไปกับการรองรับน้ำหนักของตัวเอง โดยเฉพาะในงาน โครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น อาคารสูง น้ำหนักของตัวอาคารที่ทับถมลงมาจากชั้นบนสุดจนถึงฐานรากจะมีขนาดใหญ่มากจนทำให้เกิดปัญหาในด้านการออกแบบและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย

ดังนั้นถ้าสามารถลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตให้น้อยลงโดยที่สามารถรับแรงอัดได้ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้ ซึ่งจะลดค่าใช้จ่ายลงไปได้มากทั้งทางด้านค่าใช้จ่ายด้านฐานรากและตัวอาคารเอง จากเหตุผลดังกล่าวจึงมีความสนใจในการนำเพอร์ไลต์มาใช้เป็นส่วนผสม เนื่องจากเพอร์ไลต์มีคุณสมบัติที่น้ำหนักเบา หน่วยน้ำหนักต่ำ มีความพรุนสูง ทนไฟ มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติเด่นในด้านการเป็นฉนวนกันความร้อน และสามารถที่นำไปเป็นส่วนประกอบที่ใช้ในการทำคอนกรีตมวลเบาได้ การศึกษาในครั้งนี้จึงได้นำมาเพอร์ไลต์มาใช้แทนที่ทราย และแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน แต่ในการทดลองเบื้องต้นจะศึกษาทดลองเฉพาะตัวอย่างแทนคอนกรีต(มอร์ตาร์)เท่านั้น

2. วัตถุประสงค์ในการวิจัย

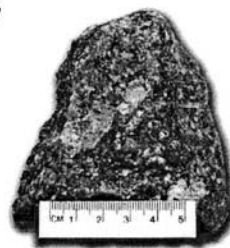
2.1 เพื่อทดลองหาสัดส่วนการผสมมอร์ตาร์มวลเบาโดยใช้เพอร์ไลต์ ซึ่งเป็นวัสดุผสมมวลเบาที่หาได้ในประเทศไทย

2.2 ทดลองหาอัตราส่วนผสมของเพอร์ไลต์ที่ทำให้มอร์ตาร์มีหน่วยน้ำหนักน้อยที่สุดและมีความสามารถในการรับแรงอัดที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานได้

2.3 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบกำลังอัดและหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์มวลเบาผสมเพอร์ไลต์กับมอร์ตาร์มาตรฐานที่มีจำหน่ายทั่วไป

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

“หินเพอร์ไลต์” (perlite) หมายถึง หินภูเขาไฟเนื้อแก้ว และรวมทั้งสิ่งที่เกิดจากการขยายตัวของหินภูเขาไฟเนื้อแก้ว เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสม หรือหมายถึงหินภูเขาไฟเนื้อแก้วทุกชนิด เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมในเวลา ที่รวดเร็ว จะขยายตัว มีน้ำหนักเบา และมีความพรุนสูง หินเพอร์ไลต์ ดังรูปที่ 3.1 ได้แก่ หินภูเขาไฟเนื้อแก้ว ที่มีลักษณะรอยแตกเป็นวงๆ ช้อนกันคล้ายกลีบหัวหอม และเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสม ในเวลา ที่รวดเร็วจะขยายตัวออกไปได้ ตั้งแต่ 4 - 20 เท่าของปริมาตรเดิม ทำให้เปลี่ยนสภาพเป็นสารที่มีน้ำหนักเบา มีความพรุนสูง และมีลักษณะคล้ายหินฟอส สารที่ได้จากการขยายตัวของหินเพอร์ไลต์นี้ เรียกว่า “เพอร์ไลต์”



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของหินเพอร์ไลต์

3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์

ความแข็งของโมห์ (mohs' scale) ระหว่าง 5.5 - 7.0 , ความถ่วงจำเพาะ 2.3 - 2.8, จุดหลอมตัว 760 - 1,300 องศาเซลเซียส, ค่าดัชนีหักเหแสง 1.490 - 1.610

3.2 คุณสมบัติทางเคมี

หินเพอร์ไลต์มีส่วนประกอบของออกไซด์ของธาตุซิลิกา ประมาณร้อยละ 70 หรือมากกว่า มีน้ำเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 2 - 5 ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารเคมีอื่นๆ ได้ง่ายนัก จัดอยู่ในจำพวกสารเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวิจัย ของคณะนักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อ ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเพอร์ไลต์ที่มีอยู่ใน ประเทศไทย โดยใช้วิธี X - Ray Fluorescence โดยศึกษา เปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์กับเพอร์ไลต์ (จิตรกร, 2548)

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนักของซีเมนต์	ร้อยละโดยน้ำหนักของเพอร์ไลต์ในประเทศไทย
CaO	60 - 67	0.57
SiO ₂	17 - 25	71.01
Al ₂ O ₃	3 - 8	16.07
Fe ₂ O ₃	0.5 - 6.0	0.71
MgO	0.1 - 4.0	0.40
Na ₂ O	0.1 - 1.8	0.92
K ₂ O	0.1 - 1.8	5.57
SO ₃	0.5 - 3.0	-
FeO	-	0.71
H ₂ O (comb)	-	3.57
อื่นๆ	0.5 - 3.0	-
(LOI)	0.1 - 3.0	-

4. ขอบเขตและวิธีการวิจัย

4.1 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
- 2) น้ำ เป็นน้ำประปาในพื้นที่ จ.นครราชสีมา
- 3) ทรายหยาบ เป็นทรายแม่น้ำจาก อำเภอชุมพวง จ.นครราชสีมา ขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 - 03
- 4) ผงเพอร์ไลต์ Type III ชนิดหยาบ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงอนุภาคของ Perlite Type III [The Quick Cote Product Co.,LTD]

Specification The Expanded Perlite			
Type	Filterlite	Type II	Type III
> 3 mm	-	-	-
2-3 mm	-	-	-
1-2 mm	-	-	-
0.5-1 mm	0 - 1%	0 - 5%	20 - 30%
0.3-0.5 mm	0 - 5%	40 - 80%	40 - 70%
< 0.3 mm	85 - 100%	0 - 35%	7.5 - 20%
Bulk Density (kg/m ³)	180 - 200	80 - 140	100 - 140

4.2 อัตราส่วนผสม

1) อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ควบคุมใช้อัตราส่วนซีเมนต์ต่อทราย 1:2.75 บ่มตัวอย่างทดสอบในน้ำที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน

2) ใช้เพอร์ไลต์แทนที่ 10, 20, 30, 40 และ 50% ทั้งการแทนที่ทราย และแทนที่ปูนซีเมนต์

3) การกำหนดสัญลักษณ์ มอร์ตาร์ควบคุม คือ SC และตัวอย่างสัญลักษณ์ในการใช้เพอร์ไลต์แทนที่ซีเมนต์และแทนที่ทราย 10% คือ SP10C และ CP10S ตามลำดับ

4.3 ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของวัสดุ

4.4 ทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวโดยใช้เข็มไวแกดตามมาตรฐาน ASTM C 191-01a

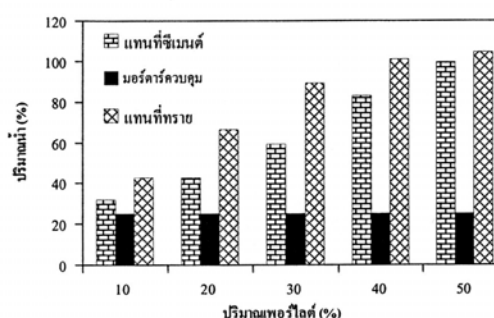
4.5 ทำการหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยใช้แบบหล่อมาตรฐาน ขนาด 5 × 5 × 5 cm โดยควบคุมเปอร์เซ็นต์การไหลผ่าน (percent flow) 105 - 115 ตามมาตรฐาน ASTM C 230 ทำการบ่มโดยการแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 3, 7, 14 และ 28 วัน ตากให้แห้งในห้องทดลอง 1 วัน วัดขนาดและชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนัก ก่อนนำไปทดสอบการรับกำลังอัด

4.6 ทดสอบกำลังอัด (compressive strength) ของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเพอร์ไลต์ ตามมาตรฐาน ASTM C 109 เปรียบเทียบกับตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม

5. ผลและอภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาได้ผลการวิจัยโดยแยกเป็นส่วน ดังนี้

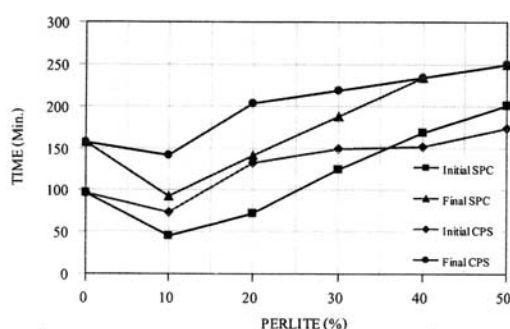
5.1 ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เพอร์ไลต์กับปริมาณน้ำ

จากรูปที่ 5.1 พบว่าปริมาณน้ำจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณเพอร์ไลต์ คือปริมาณเพอร์ไลต์ที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความต้องการปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติมากขึ้นด้วย ทั้งโดยการแทนที่ซีเมนต์และแทนที่ทราย และพบว่าเมื่อใช้เพอร์ไลต์แทนที่ทรายจะมีความต้องการปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติมากกว่าโดยการแทนที่ซีเมนต์

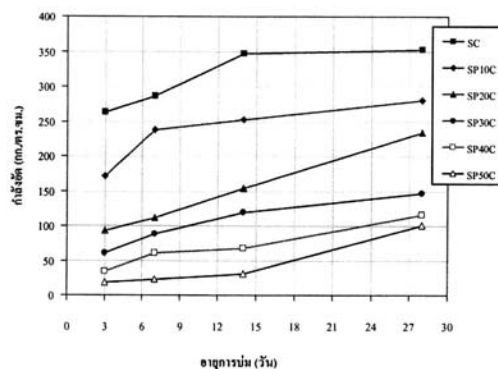
5.2 ระยะเวลาการก่อตัว



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลาย

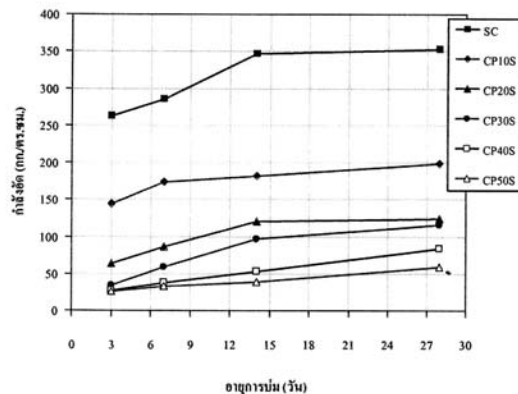
จากรูปที่ 5.2 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของเพอร์ไลต์ กล่าวคือระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลายที่มีปริมาณเพอร์ไลต์เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลายนานขึ้น

5.3 กำลังอัด



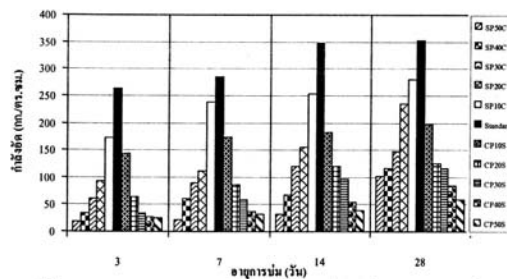
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์เพอร์ไลต์แทนที่ซีเมนต์ กับอายุการบ่ม

จากรูปที่ 5.3 พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์เพอร์ไลต์มวลเบาจะแปรผันโดยตรงกับอายุการบ่ม ซึ่งเมื่อมีอายุการบ่มมากขึ้นจะทำให้กำลังอัดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่ากำลังอัดของ SP10C มีค่าสูงสุด คือ 280 ksc และค่ากำลังอัดของ SP50C มีค่ากำลังอัดต่ำสุด คือ 108 ksc ที่อายุการบ่มที่ 28 วัน



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์เพอร์ไลต์แทนที่ทรายกับอายุการบ่ม

จากรูปที่ 5.4 พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์เพอร์ไลต์มวลเบาจะแปรผันโดยตรงกับอายุการบ่ม ซึ่งเมื่อมีอายุการบ่มมากขึ้นจะทำให้กำลังอัดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่ากำลังอัดของ CP10S มีค่าสูงสุด คือ 200 ksc และค่ากำลังอัดของ CP50S มีค่ากำลังอัดต่ำสุด คือ 59 ksc ที่อายุการบ่มที่ 28 วัน

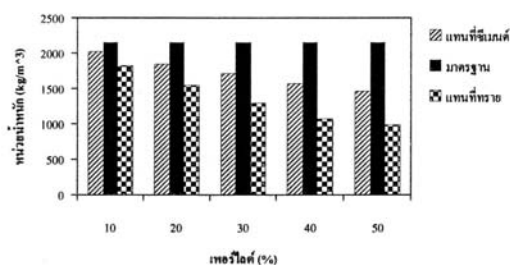


รูปที่ 5.5 กราฟกำลังอัดของมอร์ตาร์เพอร์ไลต์โดยการแทนที่และแทนที่ซีเมนต์เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม

จากรูปที่ 5.3, 5.4 และรูปที่ 5.5 จากการเปรียบเทียบพบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์เพอร์ไลต์มวลเบา SPC จะให้ค่ากำลังอัดมากกว่า CPS ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการแทนที่

ด้วยเพอร์ไลต์ของ CPS มีปริมาณที่มากกว่า SPC โดยน้ำหนัก จึงต้องการปริมาณน้ำที่ค่อนข้างมาก เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวที่เปอร์เซ็นต์การไหลแต่เดียวกัน

5.4 หน่วยน้ำหนัก



ค่าหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์จะแปรผกผันกับปริมาณของเพอร์ไลต์คือ เมื่อปริมาณเพอร์ไลต์เพิ่มขึ้นค่าหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์จะมีค่าลดลง และ CPS จะมีน้ำหนักเบา กว่า SPC เนื่องจากการใช้เพอร์ไลต์แทนที่ทราย แต่ CPS จะมีค่ากำลังอัดน้อยกว่า SPC ที่เปอร์เซ็นต์การไหลแต่เดียวกัน

6. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยมอร์ตาร์มวลเบาโดยใช้เพอร์ไลต์เป็นอัตราส่วนผสม โดยการแทนที่ซีเมนต์และการแทนที่ทราย เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม พบว่า

- จากผลการทดสอบหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ พบว่า ปริมาณน้ำที่ต้องการจะแปรผันตามปริมาณเพอร์ไลต์คือ เพสต์จะต้องการปริมาณน้ำมากขึ้นตามปริมาณเพอร์ไลต์ที่แทนที่ซีเมนต์และแทนที่ทราย อัตราส่วนที่ต้องการปริมาณน้ำมากที่สุด คือ CP50S และ SP50C มีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 76 และ 75

- การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว เมื่อใช้เพอร์ไลต์แทนที่ซีเมนต์และแทนที่ทรายในอัตราส่วนที่มากขึ้นตามเปอร์เซ็นต์การผสมจะทำให้ระยะเวลาในการก่อตัวระยะเริ่มต้นและระยะปลายเพิ่มขึ้น

- จากผลการทดสอบกำลังอัดจะพบว่ากำลังอัดจะแปรผกผันกับปริมาณเพอร์ไลต์ คือปริมาณเพอร์ไลต์มากขึ้น

กำลังอัดจะมีค่าลดลง และอัตราส่วนที่ค่ากำลังอัดน้อยที่สุด คือ SP50C และ CP50S ค่ากำลังอัดจะลดลงร้อยละ 71 และ 83 ตามลำดับ

- หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่เบาที่สุดสำหรับแต่ละอัตราส่วน คือ SP50C และ CP50S มีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,460 กก./ม.³ และ 990 กก./ม.³ ตามลำดับ จากงานวิจัยครั้งนี้ทราบว่าหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์จะแปรผกผันกับปริมาณเพอร์ไลต์ คือ ปริมาณเพอร์ไลต์มากขึ้นจะทำให้หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ลดลง และปริมาณเพอร์ไลต์ในอัตราส่วน SP50C และ CP50S หน่วยน้ำหนักจะมีค่าลดลงร้อยละ 32 และ 54

7. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยการศึกษามอร์ตาร์มวลเบาโดยใช้เพอร์ไลต์เป็นอัตราส่วนผสมโดยใช้เพอร์ไลต์แทนที่ซีเมนต์และแทนที่ทรายจะพบว่ามีความต้องการปริมาณน้ำที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อแทนที่ซีเมนต์และทรายที่ปริมาณเพอร์ไลต์มากขึ้น ค่ากำลังอัดและหน่วยน้ำหนักจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเพอร์ไลต์เพิ่มขึ้น แต่กำลังอัดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอายุการบ่ม ดังนั้นในการใช้งานสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างทั่วไปได้ที่อายุการบ่ม 28 วัน เช่น การนำมาทำผนังคอนกรีตมวลเบา ทำบล็อกคอนกรีตมวลเบา และนำมาประยุกต์ใช้ทำวัสดุสำเร็จรูปในงานก่อสร้างประเภทต่างๆ ได้ และงานวิจัยนี้ยังนำไปพัฒนาต่อเนื่องได้อีกสำหรับผู้สนใจ ในเรื่องของการใช้สารผสมเพิ่มเข้ามาเป็นส่วนผสม เช่น สารลดปริมาณน้ำเพื่อที่จะหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการปฏิบัติงาน และสารผสมเพิ่มในเรื่องของการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ให้เพิ่มสูงขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่ให้ความสะดวกด้านการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

รวมถึงผู้ร่วมวิจัย และผู้ที่เกี่ยวข้องในการวิจัยในครั้งนี้ทุกท่าน

เอกสารอ้างอิง

- [1] คม, บัวคี่ และรังสรรค์, 2540. การพัฒนามอร์ตาร์มวลเบาโดยใช้เพอร์ไลต์. เอกสารงานวิจัย. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [2] จิตรกร ตั้งอนุสรณ์สุข และคณะ, 2548. ผลกระทบของเพอร์ไลต์ต่อการซึมผ่านอากาศและปริมาณช่องว่างอากาศภายในซีเมนต์มอร์ตาร์. โครงการงานวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี : 58 หน้า
- [3] ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2537. คอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ : บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด : 206 หน้า
- [4] ปริญญ์ จินดาประเสริฐ และชัย จตุรพิทักษ์กุล, 2547. ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีต. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตไทย (ส.ค.ท.) : 346 หน้า
- [5] นิคม เลี้ยวทอง, สว่าง หาญนอก และ ทวีลาภ ใจชอบงาม, 2540. มอร์ตาร์มวลเบาโดยวิธีผสมผงอลูมิเนียม. ภาคนิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา : 61 หน้า
- [6] พรสวาท วัฒนกุล และคณะ, 2537. แนวทางการใช้ประโยชน์แร่อุตสาหกรรม แหล่งลพบุรี. รายงานการวิจัย. สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ : 41 หน้า
- [7] ศิริรัตน์ รัตนจันทร์, 2543. การศึกษาเบื้องต้นในการเตรียมวัสดุเพื่อผสมทำคอนกรีตที่มีน้ำหนักเบาจากดินที่มีอยู่ในท้องถิ่น. รายงานการวิจัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี : 76 หน้า
- [8] วินิต ช่อวิเชียร, 2544. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด ป.สัมพันธพาณิชย์ : 233 หน้า
- [9] อุคมวิทย์ กาญจนวงศ์, 2543. ปฏิบัติงานทดสอบคอนกรีตเทคโนโลยี. ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : สกานิกส์ : 284 หน้า
- [10] เอกสารวิชาการของ บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด, 2547. ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน. กรุงเทพฯ : 293 หน้า

การใช้เพอร์ไลต์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติในงานคอนกรีต

USAGE OF PERLITE TO NATURAL POZZOLAN IN CONCRETE

ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (Saksith Pantawee)¹ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ (Theerawat Sinsiri)²¹ นักศึกษาปริญญาโท, สาขาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา <sacred13@hotmail.com>² อาจารย์, หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้าง, สาขาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา
<sinsiri@sut.ac.th>

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ปอซโซลานธรรมชาติ (natural pozzolan) ในงานคอนกรีต ซึ่งปอซโซลานธรรมชาติที่ใช้เป็นเพอร์ไลต์ที่ผ่านการเผาแล้ว (expanded perlite) โดยมีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก มีอนุภาคนาขนาดเล็ก มีรูพรุนสูง และมีน้ำหนักเบา โดยการศึกษาจะนำเพอร์ไลต์แทนที่ทราย แทนที่ซีเมนต์ และผสมเพิ่ม ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมการไหลแฉ่ที่ร้อยละ 105–115 และเปรียบเทียบกำลังอัดและหน่วยน้ำหนักกับมอร์ตาร์ควบคุม จากการวิจัยพบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของเพอร์ไลต์เท่ากับ 0.92 เมื่อใช้เพอร์ไลต์แทนที่ในส่วนผสมจะทำให้ความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจึงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง เมื่อใช้เพอร์ไลต์แทนที่ทรายที่ร้อยละ 25 ได้ค่าหน่วยน้ำหนัก 1,615 กก./ม.³ มีค่ากำลังอัด 100 และ 214 กก./ชม.² และเมื่อใช้เพอร์ไลต์แทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 25 ได้ค่าหน่วยน้ำหนัก 1,969 กก./ม.³ มีค่ากำลังอัด 179 และ 250 กก./ชม.² ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ และในการใช้เพอร์ไลต์ผสมเพิ่มในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 มีค่ากำลังอัดและค่าดัชนีกำลังที่สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม โดยมีค่ากำลังอัด 405 และ 423 กก./ชม.² ที่อายุการบ่ม 60 วัน และค่ากำลังอัด 438 และ 473 กก./ชม.² ที่อายุการบ่ม 90 วัน ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้เพอร์ไลต์ในงานคอนกรีต สามารถใช้ได้ทั้งเป็นสารปอซโซลาน และทำเป็นคอนกรีตมวลเบา

ABSTRACT : This paper presents an experimental investigation on the usage of the natural pozzolan in concrete. The natural pozzolan of this study is expanded perlite, it is a type of mineralogical material containing large quantities of SiO₂ and Al₂O₃, small particles, high porosity and lightweight. In the study, the perlite was used to partially replace sand, cement and admixed of 0, 5, 10, 15, 20 and 25% by weight of binder. Comparison of the compressive strength and density of perlite mortars was performed with control mortars (the flow of 105 to 115%). The results revealed that the specific gravity of perlite was 0.90. The increasing quantity of perlite were direct effected to decrease compressive strength. The use of 25% sand replacement obtained density of 1,615 kg/m³ and compressive strength were 100 and 214 ksc, and using of 25% cement replacement obtained the density was 1,969 kg/m³ and compressive strength were 179 and 250 ksc at 28 and 90 days, respectively. And using of perlite to admixed 5 and 10 % obtained more the compressive strength and strength activity index than the control mortar, the compressive strength obtained were 405 and 423 ksc at 60 days and the compressive strength obtained were 438 and 473 ksc at 90 days, respectively. Therefore, the perlite in this studies can be making pozzolanic materials and lightweight concrete.

KEYWORDS : Perlite, Natural Pozzolan, Lightweight Concrete.

1. บทนำ

ในปัจจุบันปอซโซลาน (pozzolan) เข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากในงานคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของการผลิตคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น [1] มาตรฐาน ASTM C 618 ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา (Si) หรือซิลิกา (Si) และอลูมินา (Al) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $[Ca(OH)_2]$ ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน” วัสดุปอซโซลานเมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานคอนกรีตขนาดใหญ่หรือคอนกรีตหนา วัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในเมืองไทยมีปริมาณที่ค่อนข้างมากและสามารถนำมาใช้งานได้ เช่น เถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ นอกจากนี้ยังมีการใช้วัสดุปอซโซลานบางชนิดที่ส่งชื่อมาจากต่างประเทศ เช่น ซิลิกาฟูมที่มีความละเอียดสูงมากในการทำคอนกรีตกำลังสูง เป็นต้น [2]

ปอซโซลานธรรมชาติ เป็นปอซโซลานชั้นคุณภาพ N (class N) ตามการจำแนกโดย มาตรฐาน ASTM C 618 เป็นปอซโซลานจากธรรมชาติหรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านขบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ [3] ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานธรรมชาติส่วนใหญ่จะผ่านการปรับปรุง เช่น กระบวนการให้ความร้อนในเตาเผาและบดเป็นผงละเอียด ซึ่งอาจเป็นดินเผา (calcined clay) ดินดานเผา (calcined shale) และดินขาวเผา (metakaolin) [4]

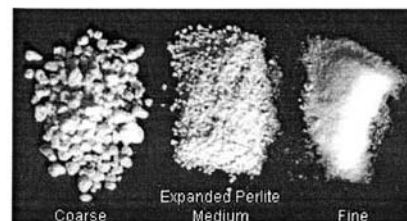
เพอร์ไลต์ (perlite) เป็นปอซโซลานชนิดหนึ่งที่มีจัดอยู่

ในกลุ่มของปอซโซลานธรรมชาติ “หินเพอร์ไลต์” หมายถึง หินภูเขาไฟเนื้อแก้วทุกชนิด เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมในเวลาที่เหมาะสมจะขยายตัว มีน้ำหนักเบา และมีความพรุนสูง หินเพอร์ไลต์ ดังรูปที่ 1 ได้แก่ หินภูเขาไฟเนื้อแก้ว ที่มีลักษณะรอยแตกเป็นวงๆ ซ้อนกันคล้ายกลีบหัวหอม [5]



รูปที่ 1 แสดงลักษณะของหินเพอร์ไลต์

เมื่อนำเพอร์ไลต์ดิบมาเผาที่อุณหภูมิ 1,000 ถึง 1,100 องศาเซลเซียส สามารถทำให้เพอร์ไลต์ขยายตัวดังรูปที่ 2 [6] โดยจะขยายตัวออกไปได้ตั้งแต่ 4 - 20 เท่าของปริมาตรเดิม ซึ่งเรียกว่า Expanded Perlite ทำให้เปลี่ยนสภาพเป็นสารที่มีน้ำหนักเบา มีความพรุนสูง และมีลักษณะคล้ายหินฟอสซิล สารที่ได้จากการขยายตัวของหินเพอร์ไลต์นี้ เรียกว่า “เพอร์ไลต์” [5]



รูปที่ 2 แสดงลักษณะของ Expanded Perlite

ภาพจาก www.Perlite.net&Redco II

จากเหตุผลดังกล่าวจึงได้ทำการศึกษาการใช้เพอร์ไลต์เป็นสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มประเภทสารปอซโซลานธรรมชาติในงานคอนกรีต และเป็นการศึกษาวัสดุใหม่ๆ ที่สามารถหาได้ในประเทศ และราคาไม่แพงมาใช้ในการก่อสร้างและเพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตลง

2. วัตถุประสงค์ในการวิจัย

2.1 เพื่อทดลองหาสัดส่วนผสมคอนกรีตโดยใช้เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสม ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่สามารถหาได้ในประเทศ

2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสม

2.3 อาจจะได้คอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักที่น้อยลงและมีกำลังอัดที่สามารถนำไปใช้งานได้ เพราะเพอร์ไลต์มีคุณสมบัติที่เด่นชัดคือ มีน้ำหนักเบาและมีความพรุนสูง

3. ขอบเขตและวิธีการวิจัย

การศึกษาโครงการวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะตัวอย่างแทนคอนกรีต (มอร์ตาร์) เท่านั้น โดยมีวัสดุและขอบเขตต่างๆ ของงานวิจัย ประกอบด้วยดังนี้

3.1 ปูนซีเมนต์ ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1

3.2 มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำ คัดขนาดตามมาตรฐาน ASTM C 33

3.3 น้ำ ใช้น้ำประปา

3.4 ศึกษาการใช้เพอร์ไลต์แทนที่ทราย แทนที่ปูนซีเมนต์ และผสมเพิ่มในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

3.5 ใช้อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ควบคุม (control mortar) โดยมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:2.75

3.6 ทำการหล่อก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 50 x 50 x 50 มม. ควบคุมการไหลเผื่อที่ร้อยละ 105-115

3.7 ทดสอบเปรียบเทียบค่ากำลังอัด (compressive strength) ตามมาตรฐาน ASTM C 109 และค่าหน่วยน้ำหนัก (unit weight) กับมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน โดยการแช่น้ำ

4. ผลและอภิปรายผลการวิจัย

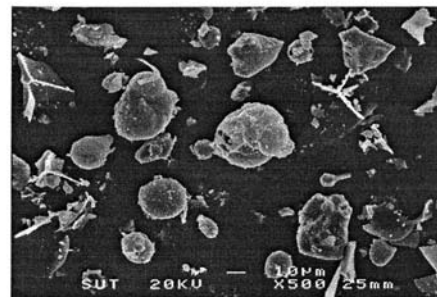
จากการศึกษาได้ผลการวิจัยโดยแยกเป็นส่วน ดังนี้

4.1 คุณสมบัติของเพอร์ไลต์

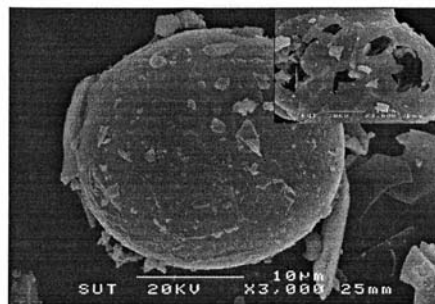
- ความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้ = 0.92
- เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ = 1.16%

- หน่วยน้ำหนักมีค่าประมาณ 121 – 150 กก./ม.³

- เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 = 82%



ก) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 500 เท่า



ข) ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,000 เท่า

รูปที่ 3 ภาพถ่าย SEM ของ Expanded Perlite

จากภาพถ่าย Scanning Electron Microscopy (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า เพอร์ไลต์มีลักษณะอนุภาคแบบกลมกลวง เพราะ มีรูพรุนสูง ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 20 ถึง 30 micron มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.92 ซึ่งน่าจะ สามารถทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักที่เบาลงได้ด้วย

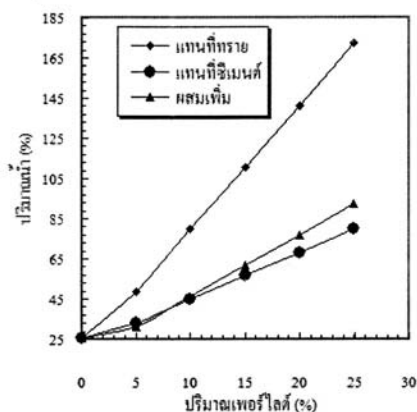
ตารางที่ 1 เปรียบเทียบปริมาณออกไซด์หลักของเพอร์ไลต์กับซีเมนต์

ปริมาณออกไซด์หลัก (% โดยน้ำหนัก)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I	20.90	4.76	3.41	65.41	0.35
เพอร์ไลต์	71.32	10.73	2.58	1.86	8.35

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่าปริมาณสารประกอบหลัก $\text{SiO}_2 = 71.32\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 10.73\%$ และ $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2.58\%$ ซึ่งเมื่อรวมกันแล้วมีค่าประมาณ 85 % และมีค่าเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 = 82 % ซึ่งกล่าวได้ว่า เฟอร์ไลต์เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ Class N ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ซึ่งกำหนดให้ปริมาณสารประกอบหลักดังกล่าวต้องมีค่ามากกว่า 70 % และมีค่า LOI ไม่มากกว่า 10 %

4.2 ผลกระทบต่อปริมาณน้ำ

ความชื้นเหลวปกติ (normal consistency) เป็นตัวกำหนดปริมาณน้ำสำหรับการผสมมอร์ตาร์ จากงานวิจัยพบว่าเมื่อปริมาณเฟอร์ไลต์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ต้องเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยที่เมื่อเพิ่มปริมาณเฟอร์ไลต์โดยการแทนที่ทราย แทนที่ซีเมนต์ และโดยการผสมเพิ่มทุก 5% จะทำให้ต้องเพิ่มปริมาณน้ำ 30.84, 11.67 และ 15.28 % ตามลำดับ เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าการไหลแก่ทุกอัตราส่วนผสมที่ร้อยละ 105 ถึง 115



รูปที่ 4 แสดงปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้เฟอร์ไลต์ในส่วนผสม

4.3 ผลกระทบต่อระยะเวลาการก่อตัว

เมื่อปริมาณเฟอร์ไลต์ในส่วนผสมเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์โดยใช้ Vicat เพิ่มขึ้น ทั้งการก่อตัวขึ้นต้นและการก่อตัวขึ้นปลาย ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยอัตราส่วนผสมที่มีระยะเวลาการก่อตัวขึ้นต้น

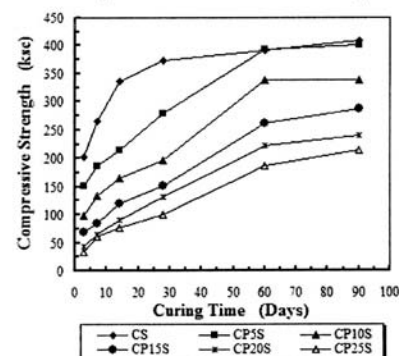
และระยะเวลาการก่อตัวขึ้นปลายเพิ่มมากที่สุดคืออัตราส่วนผสมโดยการแทนที่ทราย เพราะมีปริมาณในการแทนที่ทรายค่อนข้างมาก เนื่องจากใช้อัตราส่วน ซีเมนต์ต่อทราย 1:2.75 โดยเมื่อแทนที่ทรายด้วยเฟอร์ไลต์ 25 % ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวขึ้นต้น และระยะเวลาการก่อตัวขึ้นปลายมากที่สุด และมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมประมาณ 100 นาที

ตารางที่ 2 แสดงระยะเวลาการก่อตัวขึ้นต้นและขึ้นปลาย

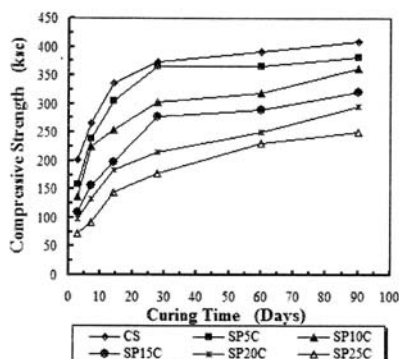
ปริมาณ เฟอร์ไลต์ (%)	ระยะเวลาการก่อตัว ขึ้นต้น			ระยะเวลาการก่อตัว ขึ้นปลาย		
	แทนที่ ทราย	แทนที่ ซีเมนต์	ผสม เพิ่ม	แทนที่ ทราย	แทนที่ ซีเมนต์	ผสม เพิ่ม
0	93	93	93	135	135	135
5	114	99	98	145	150	139
10	122	106	117	155	150	153
15	153	137	132	190	180	180
20	188	139	137	225	195	180
25	192	143	145	230	195	200

4.4 กำลังอัด

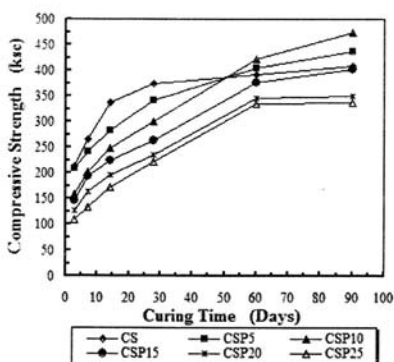
การเพิ่มขึ้นของปริมาณเฟอร์ไลต์ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณการเพิ่มขึ้นของน้ำ ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (water cement ratio, W/C) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลงดังรูปที่ 5 ถึง 7 อย่างไรก็ตามเมื่อนำเฟอร์ไลต์ผสมเพิ่มเข้าไปในส่วนผสม 5 และ 10 % ค่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นในภายหลังเมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 5 กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเฟอร์ไลต์โดยการแทนที่ทราย



รูปที่ 6 กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเพอร์ไลต์โดยการแทนที่ซีเมนต์



รูปที่ 7 กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเพอร์ไลต์โดยการผสมเพิ่ม

โดยจะมีกำลังอัด 405 และ 423 กก./ซม.² ที่อายุการบ่ม 60 วัน และมีกำลังอัด 438 และ 473 กก./ซม.² ที่อายุการบ่ม 90 วัน ตามลำดับและมีกำลังอัดสูงกว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม 16 % ที่การผสมเพิ่มด้วยเพอร์ไลต์ 10%

4.5 หนัสน้ำหนัก

จากผลการทดสอบหนัสน้ำหนักของมอร์ตาร์ ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า เมื่อปริมาณเพอร์ไลต์เพิ่มมากขึ้น ทำให้หนัสน้ำหนักของมอร์ตาร์ลดลง โดยอัตราส่วนผสมที่หนัสน้ำหนักน้อยที่สุดคืออัตราส่วนผสมโดยแทนที่ทราย 25 % มีหนัสน้ำหนัก 1,615 กก./ม.³ น้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุมประมาณ 27 % และมีกำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 100 กก./ซม.² ซึ่งกล่าวสรุปได้ว่าเพอร์ไลต์สามารถใช้

เป็นวัสดุผสมที่สามารถทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบาได้ ซึ่งเป็นประโยชน์โดยตรงต่อการผลิตคอนกรีตมวลเบา

ตารางที่ 3 แสดงหนัสน้ำหนักของมอร์ตาร์

อัตราส่วนผสม	หนัสน้ำหนัก (กก./ม. ³)					
	ปริมาณเพอร์ไลต์ (%)					
โดยการ	0	5	10	15	20	25
แทนที่ทราย	2,216	2,074	1,943	1,809	1,710	1,615
แทนที่ซีเมนต์	2,216	2,151	2,107	2,057	2,016	1,969
ผสมเพิ่ม	2,216	2,153	2,108	2,070	2,020	1,981

4.6 คัดค้านี้กำลัง

จากตารางที่ 4 พบว่ามอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์แทนที่ทราย ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน มีค่าคานี้กำลังที่สูง แต่จะลดลงอย่างมากเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อใช้เพอร์ไลต์ในส่วนผสมโดยการผสมเพิ่ม 5 ถึง 10 % มีค่าคานี้กำลังมากกว่า 0.75 ที่อายุการบ่ม 7 วัน และจะค่อยๆลดลงเมื่อปริมาณของเพอร์ไลต์เพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4 แสดงค่าคานี้กำลังของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน

อัตราส่วนผสม	ค่าคานี้กำลังที่อายุการบ่ม 7 วัน					
	ปริมาณเพอร์ไลต์ (%)					
โดยการ	0	5	10	15	20	25
แทนที่ทราย	1.00	0.89	0.85	0.59	0.50	0.35
แทนที่ซีเมนต์	1.00	0.70	0.51	0.32	0.24	0.23
ผสมเพิ่ม	1.00	0.91	0.76	0.73	0.61	0.50
อัตราส่วนผสม	ค่าคานี้กำลังที่อายุการบ่ม 28 วัน					
	ปริมาณเพอร์ไลต์ (%)					
โดยการ	0	5	10	15	20	25
แทนที่ทราย	1.00	0.98	0.81	0.74	0.58	0.48
แทนที่ซีเมนต์	1.00	0.75	0.53	0.74	0.36	0.27
ผสมเพิ่ม	1.00	0.79	0.68	0.67	0.60	0.59

และยังพบว่าอัตราส่วนผสมโดยการผสมเพิ่ม 5% และ 10 % มีค่าคานี้กำลังมากกว่า 1 ที่อายุการบ่ม 60 และ 90 วัน จึงส่งผลให้มีการพัฒนากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม และมีการพัฒนากำลังได้ดีที่สุด จากเหตุผลดังกล่าว

แสดงว่าอัตราส่วนผสมเพิ่ม 10% เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เป็นวัสดุแร่ธาตุผสมเพิ่ม ประเภทปอซโซลานธรรมชาติในงานคอนกรีต

และยังพบอีกว่าที่อายุการบ่ม 90 วัน อัตราส่วนระหว่างค่ากำลังอัดต่อหน่วยน้ำหนักมีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมคือ ส่วนผสมโดยแทนที่ทราย 5% และส่วนผสมเพิ่ม 5 และ 10% มีค่าเท่ากับ 0.20, 0.20 และ 0.22 ตามลำดับ ในขณะที่มอร์ตาร์ควบคุมมีค่าอัตราส่วนกำลังอัดต่อหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 0.18 ซึ่งเมื่อใช้เพอร์ไลต์ผสมเพิ่ม 10% มีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมประมาณ 22 %

6. สรุปผลการวิจัย

- 1) ความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณเพอร์ไลต์เพิ่มขึ้น ทำให้ W/C สูงขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง
- 2) ระยะเวลาการก่อตัวขึ้นดินและขึ้นปลายเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น แต่ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด
- 3) เมื่อใช้เพอร์ไลต์แทนที่ทราย และแทนที่ซีเมนต์ ทำให้กำลังอัดมีค่าลดลง แต่กำลังอัดจะเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการบ่มซึ่งน่าจะเป็นผลจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน
- 4) ปริมาณเพอร์ไลต์ที่เพิ่มมากขึ้นทำให้หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ลดลง จากเหตุผลนี้สามารถนำไปใช้ในงานคอนกรีตที่ต้องการน้ำหนักเบาแต่ไม่ต้องการกำลังอัดที่สูงมากในช่วงต้นได้ และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตบล็อกคอนกรีตมวลเบาได้อีกด้วย
- 5) ปริมาณเพอร์ไลต์ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน อยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 % โดยการผสมเพิ่ม จึงจะทำให้ได้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด และเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

เพอร์ไลต์มีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน มีน้ำหนักเบา มีความพรุนสูง ส่งผลให้กำลังอัดในช่วงปลายสูงขึ้นได้เมื่อใช้ในปริมาณที่เหมาะสม และสามารถใช้เพอร์ไลต์เพื่อใช้หน่วงปฏิกิริยาของคอนกรีตที่เทในปริมาณมากๆ เช่น ในงานคอนกรีตหลา อีกทั้งยังช่วยลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตให้เบาลงได้ ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่าจะสามารถลดค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้างได้

7. ข้อเสนอแนะ

เมื่อปริมาณเพอร์ไลต์เพิ่มขึ้นทำให้ความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง แต่กำลังอัดสามารถเพิ่มมากขึ้นได้เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น และควรมีการนำสารลดน้ำจำนวนมาก (super plasticizer) มาใช้ในส่วนผสมเพื่อลดปริมาณน้ำ ซึ่งจะสามารถเพิ่มกำลังของคอนกรีตให้เพิ่มสูงขึ้นได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย รวมถึงผู้ร่วมวิจัย และผู้ที่เกี่ยวข้องในการวิจัยในครั้งนี้ทุกท่าน

บรรณานุกรม

- [1] ปริญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2549. Cement Pozzolan and Concrete. พิมพ์ครั้งที่พิเศษ. :สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.
- [2] ปริญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตไทย (ส.ก.ท.) : 346 หน้า
- [3] อนนท์ ป้อมประสิทธิ์, 2545. กรมวิทยาศาสตร์บริการ ศูนย์ความรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ปอซโซลาน. [ออนไลน์]. ได้จาก: http://www.dss.go.th/dssweb/starticles/files/pep_11_2545_pozzalan.pdf.
- [4] จันทนา สุขมานนท์, 2550. INSEE Concrete Handbook. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: บริษัท เซอร์คัส เพรส จำกัด.
- [5] สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน กลุ่มวิศวกรรมและความปลอดภัย, 2546. เพอร์ไลต์. [ออนไลน์]. ได้จาก :<http://www.dpim.go.th/ppr/title.php?tid=000001074149948>.
- [6] R.V. Manukyan and N.S.Davydova, 1997. Perlite Substrate. Translated from Steklo I Keramika, No.1, pp.28 – 29.

THE USE OF NATURAL POZZOLANS IN LIGHTWEIGHT CONCRETE

S. Pantawee- Graduate Student; **T. Sinsiri-** Lecturer

Suranaree University of Technology, NakhonRatchasima, Thailand

ABSTRACT: *This paper presents an experimental investigation on the use of the natural pozzolans in concrete. The natural pozzolans used in this study were obtained from Thailand and compose of diatomaceous and perlite that are mineralogical material containing large quantities of SiO_2 and Al_2O_3 with small particles, high porosity and lightweight. Therefore, it could possibly react with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and contributes to lightweight concrete. In the study, the natural pozzolans were used to partially replace sand and Portland cement at 0, 5, 10, 15, 20 and 25% by mass of binder. Comparison of the compressive strength and density of natural pozzolans mortars were performed with control mortars (the flow of 105 to 115%).*

The results revealed that the specific gravity of diatomaceous and perlite were 2.00 and 0.50, respectively. The mortar containing diatomaceous replacing Portland cement effectively increased the compressive strength better than replacing sand. The use of 5% cement replacement obtained compressive strength of 37.0 MPa, 39 MPa at 60 and 90 days, respectively. The compressive strength at 10% and 15% admixed approached to the control mortar that were 39.5 and 38.0 MPa at 90 days, respectively. For the perlite, the increasing quantity of perlite directly effected to the compressive strength that use of 5% and 10% by admixed at 60 days obtained compressive strength were 40.0 and 41.5 MPa, respectively, and at 90 days obtained compressive strength were 43.0 and 46.5 MPa, respectively. The use of perlite of 10% by admixed was the optimum content that contributed to the highest compressive strength. Therefore both natural pozzolans in this studies can be used to make lightweight concrete.

KEYWORDS: *Diatomaceous, Perlite, Natural Pozzolan, Lightweight Concrete*

1. INTRODUCTION

The general buildings are made of the reinforce concrete that has heavy weight. However, if the main structure has light weight and high strength, it could reduce problems in buildings. Natural pozzolan is one of the lightweight aggregate that could increase the strength and durability of concrete. The natural pozzolans used in this study were obtained from Thailand and compose of diatomaceous and perlite that are mineralogical material containing large quantities of SiO_2 and Al_2O_3 with small particles, high porosity and lightweight. Therefore, it could react with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and contributes to lightweight concrete. It was found that concrete mixed with silica fume and natural pozzolan have high sulfate resistance, high strength and durability [1]. However, addition of a large quantity of the natural pozzolan decreases the compressive strength of concrete, therefore the optimum quantity is necessary to achieve the maximum compressive strength [2].

The use of diatomite calcined has been used to increase the compressive strength and decrease the density. However, the use of raw diatomite could be used to make lightweight bricks [3]. Initial setting time and final setting time increase when the quantity of diatomite increase, thus the compressive strength is developing slowly. The use of natural pozzolan in concrete can also reduce the expenses for buildings that do not mind about initial high strength [4].

The perlite from different source have been a similar characteristic [5]. Replacing aggregates in concrete with perlite has been found to decrease the density of concrete. The development of compressive strength is similar to pozzolanic reaction of fly ash or general pozzolans that the initial low compressive strength increases with time [6].

2. MATERIALS AND EXPERIMENTS

2.1 Material characterization

The physical properties of diatomite and expanded perlite are shown in Figure 1 and Figure 2. as determined by Scanning Electron Microscopy (SEM). The SEM study of the diatomite showed that the diatomite have cylindrical shape, similar to a honeycomb and ranged in size from 10 to 20 microns. Expanded perlite has high porosity, brittle and ranged in size from 10 to 250 microns. The chemical composition as determined by X-Ray Fluorescence (XRF) is shown in Table 1. Both consisted of $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ for more than 70% when compared with Portland cement type 1. The specific gravity of diatomite and perlite were 2.00 and 0.50, respectively.

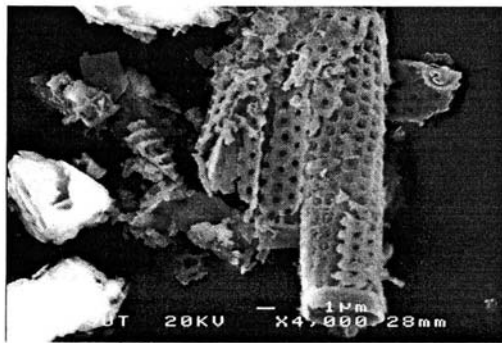


Fig. 1- SEM image of diatomite

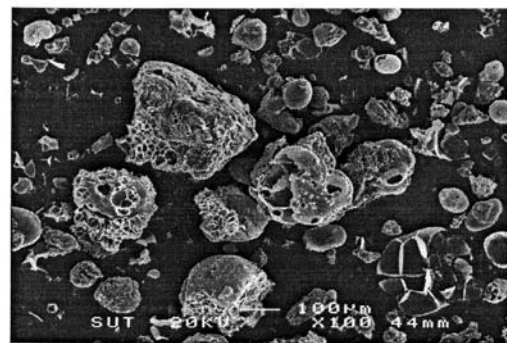


Fig. 2- SEM image of perlite

Table 1- Chemical composition of Portland cement type I, diatomite and perlite

Oxides (% by mass)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O
Portland Cement Type I	20.90	4.76	3.41	65.41	0.35
Diatomite	68.27	9.93	15.22	0.80	1.65
Perlite	71.32	10.73	2.58	1.86	8.35

2.2 Manufacture of lightweight concrete

The results discussed herein is primarily to determine certain compressive strength, density, and percentage of absorption of lightweight concrete developed with sand replacement, cement replacement and admixed by diatomite and perlite with content of 0, 5, 10, 15, 20 and 25% by mass of binder. Comparisons were done with control mortar at the age of 3, 7, 14, 28, 60 and 90 days, and control flow of mortar for 105 to 115%. The control mortar used consists of 1 part cement and 2.75 parts of sand proportioned by mass in accordance with ASTM C109.

3. Results

3.1 Compressive strength

3.1.1 Diatomite in lightweight concrete

The reported strengths in Fig. 3 to 5 are average values of three samples. The results revealed that the compressive strength and density decrease when increase content of diatomite. However the compressive strength of concrete with diatomite 5% cement replaced was similar to the compressive strength of the control mortar that were 37.0 and 39.0 MPa at 60 and 90 days, respectively. For 10% and 15% by admixed, it was found that the compressive strength approached to control mortar that were 39.5 and 38.0 MPa at 90 days, respectively.

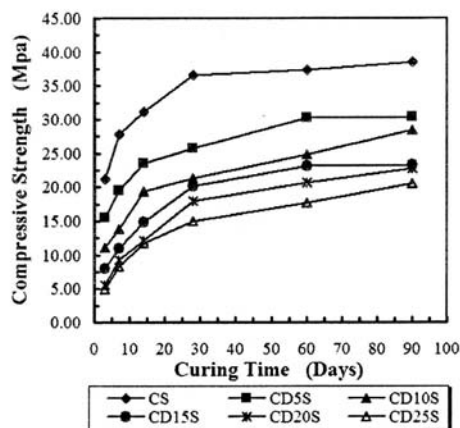


Fig. 3- Replacement sand by diatomite

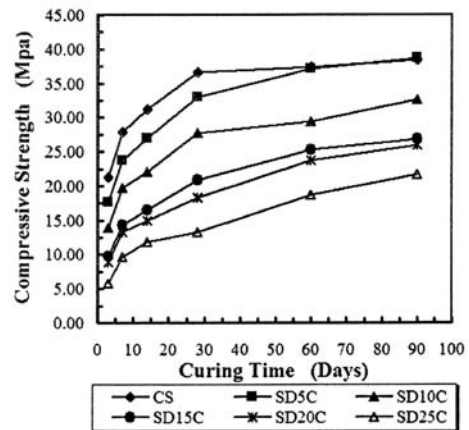


Fig. 4- Replacement cement by diatomite

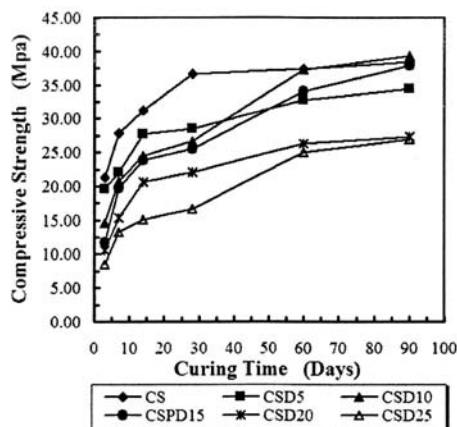


Fig. 5- Admixed by diatomite

3.1.2 Perlite in lightweight concrete

The reported strengths in Fig. 6 to 8 are the average of three samples. The results showed that the compressive strength and density decrease when increase content of perlite. However the content of perlite for 5% and 10% admixed resulted in higher increase of the compressive strength than control mortar that were 40.0, 41.5 MPa at 60 days and 43.0, 46.5 MPa at 90 days, respectively. The optimum content that contributed the highest compressive strength was 10% by admixed.

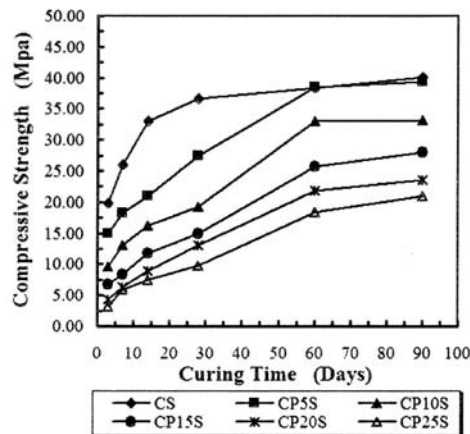


Fig. 6- Replacement sand by perlite

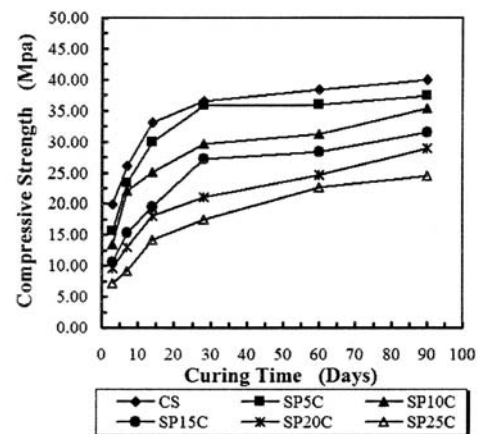


Fig. 7- Replacement cement by perlite

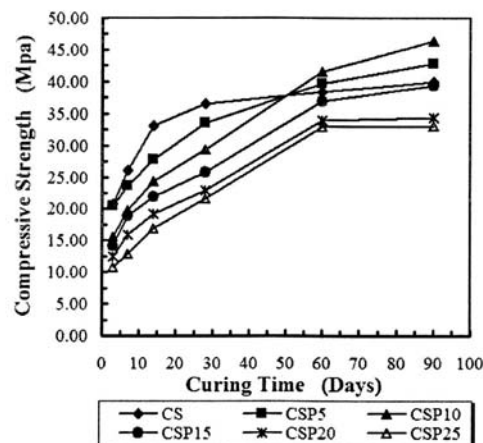


Fig. 8- Admixed by perlite

3.2 Density

The density of concrete with both natural pozzolans are shown in Fig. 9 and 10. It was found that the density decreases with increasing the amount of natural pozzolans and the minimum density were 1,700 and 1,600 kg/m³ for 25% sand replacement of diatomite and perlite, respectively. The results also showed that the optimum content can be used for making the low initial strength concrete to ensure the economical benefits in constructions.

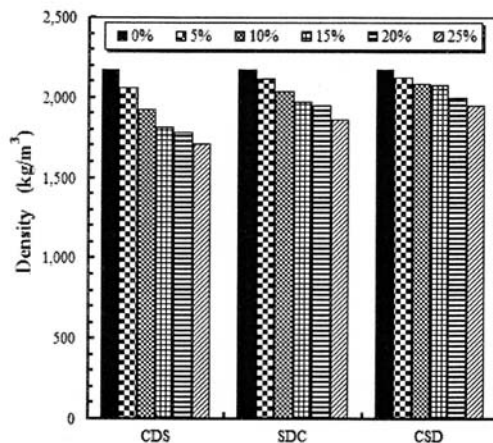


Fig. 9- Density of concrete contained diatomite

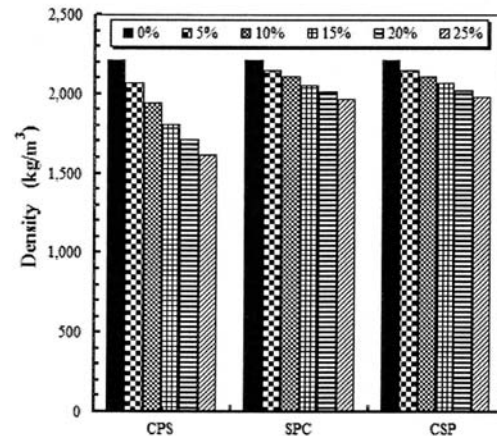


Fig. 10- Density of concrete contained perlite

3.3 Strength activity index

The strength activity index is indicating to agile reaction in accordance with ASTM C618 that decided not less than 0.75 of control mortar ratio at 7 or 28 days. Both consisted of the SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 that are principal for pozzolanic reaction similar to fly ash or general pozzolans. The percentages were not more than 5 to 10% cement replacement and admixed by perlite that have a good reaction. For diatomite, the percentages were not more than 5 to 10% cement replacement and 5% admixed that have reasonable reaction as shown in Table 2.

Table 2- Strength activity index (28 days)

Content(%)	Strength activity index (28 days)															
	Sand replaced						Cement replaced					Admixed				
	0	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25
Diatomite	1.00	0.70	0.58	0.55	0.49	0.41	0.90	0.75	0.57	0.50	0.36	0.77	0.73	0.70	0.60	0.45
Perlite	1.00	0.75	0.52	0.41	0.35	0.26	0.97	0.80	0.74	0.58	0.48	0.92	0.79	0.71	0.63	0.59

3.4 Effect of water content

Similar to general concretes, the water content in the mix plays an important role in the strength achievement of lightweight concrete. In this case, lightweight concrete had both natural pozzolans in mix, water is required to improve workability, and increasing the porosity of lightweight concrete. It can be inferred from the Fig. 11 and Fig.12 as the increasing of both natural pozzolans content resulted in increasing of the water contents caused it have a high porosity, lightweight and small particle size. The perlite ratio of the mix increased resulted in the decreases of the compressive strength, and same as diatomite in mix but the effect was less than the perlite. The replacement of perlite in mix required more water content than diatomite replacement, thus the increasing of compressive strength required the curing time to complete the reaction for decrease the porosity of the both lightweight concrete.

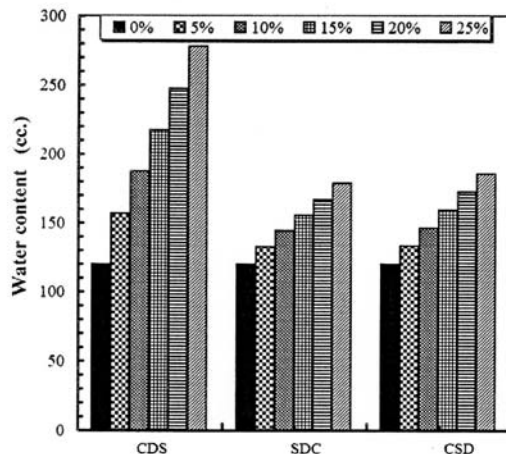


Fig.11 - Increasing water content of concrete contained diatomite

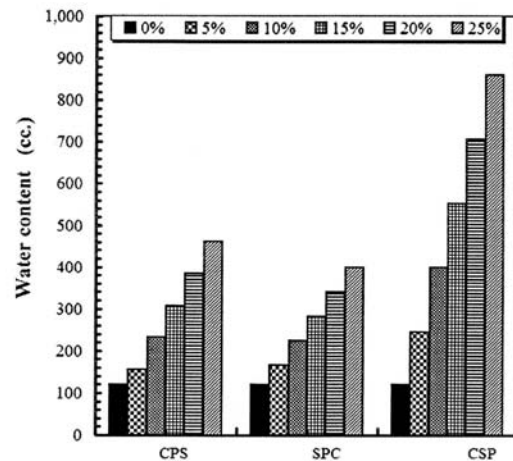


Fig.12 - Increasing water content of concrete contained perlite

4. CONCLUSIONS

The conclusions of this study can be listed as following

1. Both natural pozzolans have a negative effect on the compressive strength when used at a high dosage. Compressive strength decreases if increasing quantity of the diatomite and perlite, but the pozzolanic reaction occurred when the curing time increases.
2. Similar to general pozzolan materials, increasing of both pozzolans content affected to water content that in the mix plays an important role in the strength achievement of lightweight concrete.
3. The density of lightweight concrete had both natural pozzolans showed lower density.
4. The optimum content can be used to make the low initial strength concrete. There is a maximum pozzolan amount that can be used with an optimum productivity and efficiency to achieve maximum strength.
5. The optimum dosage of diatomite and perlite to obtain the maximum strength were approximately 10% by admixed. This optimization method can be used for the production of blended cements.

Thus the diatomite and perlite have pozzolanic property, high porosity and lightweight which ensures economical benefits in constructions.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

Supports given by Suranaree University of Technology and Rajamangala University of Technology Isan, NakhonRatchasima, Thailand are gratefully acknowledged.

REFERENCES

1. M.J.Shannag, H.A.Shania. (2003). *Sulfates Resistant of High-performance Concrete*. Cement and Concrete Composites 25:363-369.
2. B.Y. Pekmezci and S. Akyüz. (2004). *Optimum Usage of A Natural Pozzolan for The Maximum Compressive Strength of Concrete*. Cement and Concrete Research. 34. p.2175-2179.
3. K. Pimraksa and P. Chindaprasirt. (2008). *Lightweight Bricks Made of Diatomaceous Earth, Lime and Gypsum*. Ceramics International. CERI-2954; No of Pages 8.
4. A.C. Aydın and R. Gul. (2006). *Influence of Volcanic Originated Natural Materials as Additives on The Setting Time and Some Mechanical Properties of Concrete*. Construction and Building Materials. 21. p.1277-1281.
5. I.B.Topcu and B.Isikdag. (2007). *Effect of Expanded Perlite Aggregate on The Properties of Lightweight Concrete*. Journal of Materials Processing Technology PROTEC-11355; No. of Pages 5.
6. R. Demirboga, I. Orung and R. Gul. (2001). *Effects of Expanded Perlite Aggregate and Mineral Admixtures on The Compressive Strength of Low-Density Concretes*. Cement and Concrete Research. 31. p.1627-1632.

ประวัติผู้เขียน

นายศักดิ์สิทธิ์ พันทวี เกิดวันศุกร์ ที่ 13 สิงหาคม 2519 ที่อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษา ที่โรงเรียนเทศบาลวัดบูรพาภิราม จังหวัดร้อยเอ็ด ศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1 ถึง 3 ที่โรงเรียนร้อยเอ็ดวิทยาลัย ศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ แผนกวิชาสถาปัตยกรรม ที่สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา ศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง แผนกวิชาโยธา ที่โรงเรียนเทคโนโลยีช่างกลพาณิชย์การ นครราชสีมา และเมื่อปี พ.ศ. 2546 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ในปัจจุบัน) ก่อนศึกษาในระดับปริญญาตรี ปฏิบัติหน้าที่เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทดสอบคอนกรีต และห้องปฏิบัติการโครงสร้าง ภายหลังจบปริญญาตรีปฏิบัติหน้าที่สอน ณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ในวุฒิปริญญาตรี ดังนั้น เพื่อเป็นการพัฒนาตนเองทั้งในด้านความรู้ ความสามารถ ในด้านการสอน และแนวความคิดริเริ่มใหม่ ๆ ในด้านงานวิจัย จึงเกิดแรงจูงใจเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2550 ในระหว่างการศึกษาได้มีบทความวิจัยตีพิมพ์ภายในประเทศ 4 บทความ และบทความวิจัยตีพิมพ์ต่างประเทศ 1 บทความ ดังปรากฏในภาคผนวก ง.