การศึกษาเบื้องต้นของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์

นางสาวเมธาวี ศรีวัฒนพงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2551

A STUDY OF LIGHTWEIGHT CONCRETE ADMIXED WITH DIATOMITE AND PERLITE

Methawee Sriwattanapong

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

การศึกษาเบื้องต้นของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____

(รศ. ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข)
ประธานกรรมการ

_____

(ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ สินศิริ)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

_____

(ศ. ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ)
กรรมการ

_____

(รศ. ดร.อำนาจ อภิชาติวัลลภ)
กรรมการ

_____

(รศ. ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์)
กรรมการ

_____

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

_____

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เมธาวี ศรีวัฒนพงศ์ : การศึกษาเบื้องต้นของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ (A STUDY OF LIGHTWEIGHT CONCRETE ADMIXED WITH DIATOMITE AND PERLITE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ สินศิริ, 133 หน้า

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ คือ ทดลองหาอัตราส่วนผสมคอนกรีตโดยใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ในส่วนผสม ให้ได้คอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักไม่เกิน 2000 kg/m^3 และมีกำลังอัดไม่ต่ำกว่า 300 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน การทดลองเริ่มจากออกแบบกลุ่มคอนกรีตควบคุมให้มีค่ากำลังอัด 450 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน มวลรวมหยาบที่ใช้เป็นหินปูน จากนั้นใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์หรือทรายในอัตราส่วน 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนัก และเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทรายในอัตราส่วน 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนัก ควบคุมค่าการยุบตัวระหว่าง 8 ถึง 10 cm

เมื่อใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ที่ 30 ถึง 50% หน่วยน้ำหนักลดลงเหลือ 2176 ถึง 2075 kg/m^3 และกำลังอัดลดลงเหลือ 184 ถึง 92 ksc จากคอนกรีตกลุ่มควบคุมที่มีหน่วยน้ำหนัก 2267 kg/m^3 และกำลังอัด 455 ksc เมื่อใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ทรายที่ 30 ถึง 50% หน่วยน้ำหนักลดลงเหลือ 2211 ถึง 2014 kg/m^3 และกำลังอัดลดลงเหลือ 298 ถึง 105 ksc ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ที่ 30 ถึง 50% หน่วยน้ำหนักลดลงเหลือ 1848 ถึง 1618 kg/m^3 และกำลังอัดลดลงเหลือ 114 ถึง 11 ksc และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทรายที่ 30 ถึง 50% หน่วยน้ำหนักลดลงเหลือ 1980 ถึง 1741 kg/m^3 และกำลังอัดลดลงเหลือ 234 ถึง 170 ksc

พบว่าส่วนผสมข้างต้นแม้จะลดหน่วยน้ำหนักได้แต่กำลังอัดลดลงเช่นกัน เมื่อให้คอนกรีตกลุ่มควบคุมมีปริมาณปูนซีเมนต์ 125% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทรายที่ 30 ถึง 50% หน่วยน้ำหนักลดลงจาก 2479 kg/m^3 เหลือ 2089 ถึง 1917 kg/m^3 และกำลังอัดลดลงจาก 857 ksc เหลือ 549 ถึง 411 ksc และให้คอนกรีตกลุ่มควบคุมมีปริมาณปูนซีเมนต์ 150% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทรายที่ 30 ถึง 50% หน่วยน้ำหนักลดลงจาก 2458 kg/m^3 เหลือ 2121 ถึง 1783 kg/m^3 และกำลังอัดลดลงจาก 861 ksc เหลือ 552 ถึง 324 ksc

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

METHAWEE SRIWATTANAPONG : A STUDY OF LIGHTWEIGHT CONCRETE ADMIXED WITH DIATOMITE AND PERLITE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. THEERAWAT SINSIRI, Ph.D., 133 PP.

LIGHTWEIGHT CONCRETE / NATURAL POZZOLAN / DIATOMITE / PERLITE

The purpose of this study is to determine the mix of lightweight concrete admixed with diatomite or perlite having a unit weight of less than 2000 kg/m^3 and a 28 – day compressive strength of not less than 300 ksc. The control group concrete was designed at compressive strength 450 ksc. Diatomite or perlite was then used to replace cement or sand at 30, 40 and 50% by weight. The workability of the fresh concrete was controlled by keeping the slump at 8 – 10 cm. It was found that replacing cement with diatomite by 30 to 50% reduced the unit weight from 2267 kg/m^3 to 2176 – 2075 kg/m^3 and reduced the compressive strength from 455 ksc to 184 – 92 ksc. Replacing sand with diatomite reduced the unit weight in a similar manner (2211 – 2014 kg/m^3) and the compressive strength was reduced in a similar manner (298 – 105 ksc). Replacing cement with perlite by 30 to 50% reduced the unit weight to 1848 – 1618 kg/m^3 and reduced the compressive strength to 114 – 11 ksc. Replacing sand with perlite gave a better result of unit weight between 1980 – 1741 kg/m^3 and compressive strength between 234 – 170 ksc.

To increase the compressive strength the concrete in the control group was increased by 25 and 50% for the next trial mixes and only sand was be replaced by perlite. For the 125% cement control group replacing sand with perlite by 30 to 50% reduced the unit weight from 2479 kg/m^3 to 2086 – 1917 kg/m^3 and reduced the

compressive strength from 857 ksc to 544 – 411 ksc. For the 150% cement control group replacing sand with perlite by 30 to 50% reduced the unit weight from 2458 kg/m^3 to 2121 – 1783 kg/m^3 and reduced the compressive strength from 861 ksc to 552 – 324 ksc.

School of Civil Engineering

Academic Year 2008

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Co-Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ สินศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ดูแลเอาใจใส่ในการศึกษาของผู้วิจัยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ ในการสละเวลาอันมีค่าของท่านในการเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รศ.ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการวางแผนการศึกษาเป็นอย่างดี

รศ.ดร.อำนาจ อภิชาติวัลลภ กรรมการ ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษาในการเขียนและตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

รศ.ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์ กรรมการ ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์อย่างมากในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงความรู้ในด้านวิชาการ และคำอบรมสั่งสอนที่ดี

คุณศักดิ์สิทธิ์ พันทวี คุณสุนทร นาคโคตร และคุณหวังแก้ว บุญสวน ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือที่ดีมาโดยตลอด

เต๋า ฝน เซ็นต์ และพี่หนึ่ง เพื่อนร่วมอุดมการณ์ ความสุขสนุกสนาน *“เพื่อเพื่อน เพื่อฝัน เพื่อวันเกียรติยศ “*

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย

เจ้าหน้าที่สถานวิจัย เจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่ดูแลเอาใจใส่และอำนวยความสะดวกอย่างมากในเรื่องเอกสารต่าง ๆ และผู้ที่มีส่วนร่วมในงานวิจัยนี้ทุกท่าน

ท้ายสุดนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัว ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษา และเป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด ประโยชน์อันใดอันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่บิดา มารดา และคณาจารย์ทุกท่านที่ได้เมตตาอบรมสั่งสอน

เมธาวี ศรีวัฒนพงศ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ฆ
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ช
สารบัญรูป ..... ฎ

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 ขอบเขตการวิจัย 2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย 3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
2 ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 บทนำ 4
2.2 คอนกรีตมวลเบา 4
2.3 วัสดุปอซโซลาน 5
2.4 ซิลิกาฟูม 11
2.5 ปอซโซลานธรรมชาติ 15
2.5.1 ไดอะตอมไมท์ 16
2.5.2 เพอร์ไลท์ 30
2.6 สรุปปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 50

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3 วิธีการดำเนินการวิจัย 53
3.1 บทนำ 53
3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย 53
3.2.1 การทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ ไดอะตอมไมท์ และเพอร์ไลท์ 53
3.2.2 การทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม 54
3.3 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต 55
3.3.1 กำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย 55
3.3.2 ข้อกำหนดและความต้องการในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต 56
3.3.3 ขั้นตอนในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต 56
3.4 การศึกษาผลกระทบของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ต่อกำลังอัด หน่วยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต 61
3.4.1 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสด 61
3.4.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตแข็งตัว 62
4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล 66
4.1 ลักษณะทางกายภาพของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ 66
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ 67
4.3 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ 68
4.4 ความเป็นผลึกของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ 70
4.5 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ 71
4.6 ผลกระทบของปริมาณน้ำที่มีต่อคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์ หรือเพอร์ไลท์ 72
4.7 คุณสมบัติด้านกำลังอัด 75
4.8 หน่วยน้ำหนัก 83
4.9 การจำแนกคอนกรีตมวลเบา 87
4.10 โมดูลัสยืดหยุ่น 89
4.11 การดูดซึมน้ำ 94

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.12 การวิเคราะห์ราคา 96
5 บทสรุป 99
5.1 สรุปผลงานวิจัย 99
5.2 ข้อเสนอแนะ 100
รายการอ้างอิง 101
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย 104
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต 109
ภาคผนวก ค. รูปเรื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย 116
ภาคผนวก ง. บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ 120
ประวัติผู้เขียน 133

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 7
2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของปอซโซลานเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C 618 8
2.3 ข้อกำหนดทางกายภาพ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 8
2.4 ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C 618 9
2.5 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของวัสดุประสาน
(ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) 12
2.6 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าถ่านหิน
เถ้าแกลบบด ตะกรันเตาถลุงเหล็ก และซิลิกาฟูม (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) 13
2.7 ส่วนผสมและกำลังอัดของคอนกรีตที่มีและไม่มีซิลิกาเป็นส่วนผสม
(ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) 14
2.8 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของไดอะตอมไมท์จากแหล่งลำปาง
(Kedsarin Pimraksa, 2008) 18
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิการเผา หน่วยน้ำหนัก และค่ากำลังอัดประลัย
(Kedsarin Pimraksa, 2008) 20
2.10 องค์ประกอบทางเคมีของไดอะตอมไมท์ประเทศกรีซ เยอรมัน และเดนมาร์ก
(Fragoulisa et al., 2004) 21
2.11 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของไดอะตอมไมท์ประเทศตุรกีกับปูนซีเมนต์
(Aydin and Gul, 2007) 23
2.12 ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นและขั้นปลายของคอนกรีตผสมไดอะตอมไมท์
(Aydin and Gul, 2007) 24
2.13 เปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเพอร์ไลท์กับปูนซีเมนต์
ผสมทราย (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546) 32
2.14 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์กับเพอร์ไลท์
(จิตรกร ตังอนุสรณ์สุข, 2548) 33

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

2.15 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน และเพอร์ไลท์ (Demirboga, Orung, and Gul, 2001) 35
2.16 การนำความร้อนและความหนาแน่นของคอนกรีตผสมเพอร์ไลท์ (Demirboga and Gul, 2003) 37
2.17 กำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วันของคอนกรีตผสมเพอร์ไลท์ (Demirboga and Gul, 2003) 38
2.18 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ ชนิดหยาบ(ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550) 49
3.1 จำนวนตัวอย่างการทดสอบความถ่วงจำเพาะ, Laser Particle Size, XRF, XRD, SEM, TEM และ TGA 54
3.2 จำนวนตัวอย่างทดสอบสารอินทรีย์เจือปน ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ ขนาดคละ และหน่วยน้ำหนัก 54
3.3 สัญลักษณ์ของแต่ละสัดส่วนผสม 55
3.4 ปริมาณของส่วนผสมต่าง ๆ ของคอนกรีต 58
3.5 ปริมาณของส่วนผสมต่าง ๆ ต่อคอนกรีต 1 m^3 59
3.6 สัญลักษณ์ของแต่ละสัดส่วนผสมใหม่ 60
3.7 ปริมาณของส่วนผสมต่าง ๆ ของคอนกรีตที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% 60
3.8 ปริมาณของส่วนผสมต่าง ๆ ที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% ต่อคอนกรีต 1 m^3 61
3.9 จำนวนตัวอย่างทดสอบระยะเวลาก่อตัวและหน่วยน้ำหนัก 62
3.10 จำนวนตัวอย่างทดสอบกำลังอัด หน่วยน้ำหนักและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ที่ใช้ไดอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์และ/หรือทราย 63
3.11 จำนวนตัวอย่างทดสอบกำลังอัด หน่วยน้ำหนักและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 64
3.12 จำนวนตัวอย่างทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่ใช้ไดอะตอมไมท์และ/หรือ เพอร์ไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์และ/หรือทราย 64

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

3.13 จำนวนตัวอย่างทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่เพิ่มปริมาณ ปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 65

4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์..... 66

4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)..... 68

4.3 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์ หรือเพอร์ไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์..... 74

4.4 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์ หรือเพอร์ไลท์แทนที่ทราย 75

4.5 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์..... 84

4.6 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 85

4.7 จำแนกคอนกรีตมวลเบาตามหน่วยน้ำหนัก..... 88

4.8 ราคาของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ 97

4.9 ราคาของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 98

ก.1 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของ ไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)..... 105

ก.2 ค่าความถ่วงจำเพาะของไดอะตอมไมท์..... 105

ก.3 ค่าความถ่วงจำเพาะของเพอร์ไลท์..... 106

ก.4 ผลการวิเคราะห์ Lazer Particle Size ของไดอะตอมไมท์..... 107

ก.5 ผลการวิเคราะห์ Lazer Particle Size ของเพอร์ไลท์ 108

ข.1 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์..... 110

ข.2 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 111

ข.3 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์..... 112

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ข.4 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 113
ข.5 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ 114
ข.6 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 115

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 ภาพขยายของไดอะตอมไมท์ (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550) 16

2.2 ภาพถ่าย SEM ของไดอะตอมไมท์จากแหล่งลำปาง
(Kedsarin Pimraksa, 2008) 17

2.3 กราฟ DTA และ TGA ของไดอะตอมไมท์ลำปาง
(Kedsarin Pimraksa, 2008) 18

2.4 ภาพถ่าย SEM ของอิฐที่ทำการแปรผันอุณหภูมิในการเผาไดอะตอมไมท์
(Kedsarin Pimraksa, 2008) 19

2.5 ผลิตภัณฑ์มวลรวมเบา (production of lightweight aggregates, LWAs)
(Fragoulisa et al., 2004) 20

2.6 ภาพถ่าย SEM ของไดอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ (Fragoulisa et al., 2004) 22

2.7 ความสัมพันธ์กำลังอัดของคอนกรีตกับเปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม
(Aydin and Gul, 2007) 24

2.8 ความสัมพันธ์โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกับเปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม
(Aydin and Gul, 2007) 25

2.9 ความสัมพันธ์ปริมาณน้ำกับปริมาณไดอะตอมไมท์
(ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)…. 26

2.10 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ทราย
(ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)…. 26

2.11 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์
(ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี,2550)…. 27

2.12 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ไดอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ
โดยการแทนที่ทราย (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550) 28

2.13 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ไดอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ
โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550) 29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

2.14 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ไดอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ
โดยการผสมเพิ่ม (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550) 30
2.15 ภาพขยายของเพอร์ไลท์ (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)..... 30
2.16 ความสัมพันธ์อัตราส่วนเพอร์ไลท์กับกำลังอัดของคอนกรีต
(Demirboga, Orung and Gul, 2001)..... 36
2.17 ความสัมพันธ์ปริมาณน้ำกับปริมาณเพอร์ไลท์ชนิดหยาบ
(ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550) 40
2.18 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดหยาบแทนที่ทราย
(ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550) 41
2.19 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดหยาบแทนที่ปูนซีเมนต์
(ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550) 42
2.20 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์
ชนิดหยาบ ที่อายุการบ่ม 28 วัน (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)..... 43
2.21 ความสัมพันธ์ปริมาณน้ำกับปริมาณเพอร์ไลท์ชนิดละเอียด
(ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550) 44
2.22 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดละเอียดเป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ
โดยการแทนที่ทราย (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550) 45
2.23 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดละเอียดเป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ
โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)..... 46
2.24 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดละเอียดเป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ
โดยการผสมเพิ่ม (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550) 47
2.25 เปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์
ชนิดละเอียดผสมเพิ่มในส่วนผสม 5, 10 และ 15% ที่อายุการบ่ม
28, 60 และ 90 วัน (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550) 48
4.1 การกระจายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ไดอะตอมไมท์
และเพอร์ไลท์..... 67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.2 (ก) ภาพถ่าย SEM ของไดอะตอมไมท์ 69
(ข) ภาพถ่าย TEM ของไดอะตอมไมท์ 69
4.3 (ก) ภาพถ่าย SEM ของเพอร์ไลท์ 69
(ข) ภาพถ่าย TEM ของเพอร์ไลท์ 69
4.4 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของไดอะตอมไมท์ 70
4.5 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของเพอร์ไลท์ 70
4.6 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของไดอะตอมไมท์สัมพัทธ์กับอุณหภูมิ 71
4.7 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของของเพอร์ไลท์สัมพัทธ์กับอุณหภูมิ 71
4.8 ปริมาณน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ 72
4.9 ปริมาณน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50%
และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 73
4.10 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 76
4.11 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ทราย 77
4.12 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 78
4.13 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 79
4.14 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ 80
4.15 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25%
และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 81
4.16 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 50%
และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 82
4.17 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์
25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 83
4.18 เปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักแห้งของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณ
ปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 86
4.19 ความสัมพันธ์กำลังอัดกับหน่วยน้ำหนักแห้งของคอนกรีตมวลเบา
ที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 87

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.20 เปรียบเทียบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์
หรือเพอร์ไลท์ 89
4.21 เปรียบเทียบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณ
ปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 90
4.22 ความสัมพันธ์โมดูลัสยืดหยุ่นกับกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา
ที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 91
4.23 ความสัมพันธ์โมดูลัสยืดหยุ่นกับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบา
ที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 91
4.24 ความสัมพันธ์หน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตมวลเบา 92
4.25 (ก) ลักษณะการวิบัติของคอนกรีตมวลเบาผสมเพอร์ไลท์
แบบเฉือนหรือรูปกรวย 93
(ข) ลักษณะการวิบัติของคอนกรีตมวลเบาผสมเพอร์ไลท์
แบบผ่าซีกหรือแนวตรง 93
(ค) ลักษณะการวิบัติของคอนกรีตมวลเบาผสมเพอร์ไลท์แบบระเบิด 93
4.26 เปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์
หรือเพอร์ไลท์ 95
4.27 เปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณ
ปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 96
ค.1 เครื่อง Laser Particle Size Analyzer 117
ค.2 เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) 117
ค.3 เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) 118
ค.4 เครื่อง Thermo Gravimetric Analyzer (TGA) 118
ค.5 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) 119
ค.6 เครื่อง Transmission Electron Microscope (TEM) 119

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

องค์อาคารคอนกรีตทั่วไป เช่น คาน เสา ฐานราก มักต้องออกแบบให้มีขนาดใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาคารสูง เนื่องจากคอนกรีตทั่วไปมีหน่วยน้ำหนักประมาณ 2200 ถึง 2600 kg/m^3 (บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรมจำกัด, 2548) หน่วยน้ำหนักที่ค่อนข้างมากเช่นนี้ทำให้ต้องออกแบบโครงสร้างให้รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (dead load) ของโครงสร้างเองจึงทำให้โครงสร้างมีขนาดใหญ่ วิธีการหนึ่งที่จะลดขนาดของโครงสร้างลงได้ คือการทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักลดลง ปัจจุบันมีการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตเพื่อให้มีหน่วยน้ำหนักน้อยลงและมีคุณสมบัติเหมาะสมสามารถใช้งานได้ทุกขั้นตอนการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เช่น ความสามารถในการลำเลียง ความสามารถในการเทได้ และความสามารถในการรับแรงอัด เป็นต้น

จากงานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่ได้มีการนำวัสดุผสมเพิ่มในกลุ่มสารปอซโซลาน (pozzolan) ทั้งในกลุ่มที่ได้จากขบวนการผลิต (artificial pozzolan) เช่น เถ้าถ่านหิน (fly ash) เถ้าแกลบ (rice husk ash) เถ้าก้นเตา (bottom ash) ตะกรันจากเตาถลุง (blast furnace slag) ซิลิกาฟูม (silica fume) และกลุ่มสารปอซโซลานธรรมชาติ (natural pozzolan) เช่น ดินขาวเผา (metakaolin) ไดอะตอมไมท์ (diatomite) และเพอร์ไลท์ (perlite) เป็นต้น งานวิจัยในต่างประเทศได้มีการนำไดอะตอมไมท์ และเพอร์ไลท์มาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต เช่น ลดน้ำหนักคอนกรีต ลดปฏิกิริยาอัลคาไล ลดการเยิ้ม และลดการแยกตัว เป็นต้น

ในประเทศไทยยังมีการศึกษาวิจัยในเรื่องการนำปอซโซลานธรรมชาติดังกล่าวมาใช้ในงานคอนกรีตเพื่อลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตค่อนข้างน้อย จึงได้มีแนวความคิดที่จะนำไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มประเภทปอซโซลานธรรมชาติมีคุณสมบัติเป็นสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) หรือสารอลูมิโนฟอสเฟต (aluminophosphate) มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดีและสามารถทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักลดลงและประหยัดค่าก่อสร้าง อีกทั้งยังสามารถเป็นฉนวนกันความร้อนและเสียง และยังเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา เพอร์ไลท์สามารถเผาให้ขยายตัวได้ 15 ถึง 20 เท่า (expand perlite aggregate) เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1100°C (Topcu and Isikdag, 2007) ในกรณี

ของมอร์ต้าร์เมื่อนำเอาเพอร์ไลท์แทนที่ทราย 50% สามารถลดหน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์ให้เหลือเพียง 990 kg/m^3 และมีกำลังอัด 59 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน แต่เนื่องจากไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์มีความหนาแน่นต่ำและมีความพรุนสูง จึงมีความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น ทำให้กำลังอัดลดลง (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนำสารปอซโซลานธรรมชาติดังกล่าวมาศึกษาโดยการใช้แทนที่ปูนซีเมนต์และทรายโดยน้ำหนักตามสัดส่วนผสมที่ได้ออกแบบ และเนื่องจากไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์มีความพรุนสูง ทำให้ความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น เพื่อลดปริมาณน้ำในส่วนผสมเพื่อให้ได้ค่ากำลังอัดที่เหมาะสม และยังคงมีความสามารถทำงานได้ดี จึงจำเป็นต้องใส่สารลดน้ำจำนวนมาก (superplasticizer) เพื่อลดปริมาณน้ำในส่วนผสมที่มากเกินไปและจากความต้องการที่จะนำคอนกรีตที่มีส่วนผสมของไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ไปใช้ในโครงสร้างอาคารจริงได้จึงจำเป็นต้องใส่มวลรวมหยาบ (หิน) เข้าไปในส่วนผสมเพื่อเพิ่มปริมาตรของส่วนผสมซึ่งจะเป็นการประหยัดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต มวลรวมหยาบจะช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน (durability) ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก (volume stability) รวมทั้งยังทำหน้าที่ในการต้านทานน้ำหนักที่กดลงบนคอนกรีตอีกด้วย (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2540) ดังนั้นถ้าสามารถลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตให้น้อยลงโดยที่สามารถรับกำลังอัดได้ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ในงานโครงสร้างจริงได้ จะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลงไปได้มาก อีกทั้งยังเป็นการนำเอาวัสดุที่สามารถหาได้ ในประเทศมาใช้ให้เกิดคุณค่ามากที่สุด และเป็นแนวทางในการพัฒนาเพื่อการนำไปใช้ในงานก่อสร้างต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อหาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์หรือทรายด้วยไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักไม่เกิน 2000 kg/m^3 และมีกำลังอัดไม่ต่ำกว่า 300 ksc โดยใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอก ที่อายุการบ่ม 28 วัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามวิธีของสถาบันคอนกรีตอเมริกัน (ACI)

1.3.2 ปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมคอนกรีตเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

1.3.3 มวลรวมละเอียดที่ใช้ผสมคอนกรีตใช้ทรายแม่น้ำ

1.3.4 มวลรวมหยาบที่ใช้ผสมคอนกรีตใช้หินปูน

1.3.5 น้ำที่ใช้ผสมและบ่มคอนกรีตใช้น้ำประปา

1.3.6 สารผสมเพิ่มที่ใช้จะใช้สารลดน้ำจำนวนมากเพื่อลดปริมาณน้ำในส่วนผสม และซิลิกาฟูมเพื่อเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตทั้งช่วงต้นและช่วงปลาย (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

1.3.7 ผสมไดอะตอมไมท์จากจังหวัดลำปางหรือเพอร์ไลท์จากจังหวัดลพบุรี ลงในคอนกรีตทำโดยใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์หรือทรายและใช้เพอร์ไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์หรือทรายเพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตเมื่อใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์เป็นส่วนผสม ไม่ต่ำกว่า 300 ksc และมีหน่วยน้ำหนักไม่เกิน 2000 kg/m^3

1.3.8 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต

1.3.9 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสด ได้แก่ การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวและการทดสอบหาหน่วยน้ำหนัก

1.3.10 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ได้แก่ การทดสอบกำลังอัด ทดสอบหาหน่วยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต โดยตัวอย่างทดสอบจะใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm ตัวอย่างจะถูกถอดออกจากแบบเมื่ออายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำทันทีจนถึงเวลาทดสอบ ในกรณีของการทดสอบกำลังอัด หน่วยน้ำหนักและการดูดซึมน้ำจะทดสอบที่อายุ 1, 7, 14, 28 และ 60 วัน ส่วนการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะทดสอบที่อายุ 28 และ 60 วัน

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1.4.1 ทำการศึกษาทฤษฎีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและวิธีการทดสอบต่าง ๆ

1.4.2 ดำเนินการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต

1.4.3 วิเคราะห์และออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต

1.4.4 ดำเนินการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตและบันทึกข้อมูล

1.4.5 วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดสอบ อภิปราย สรุปเป็นความรู้

1.4.6 สรุปผลการวิจัยและจัดทำรายงานเอกสาร

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.5.1 ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อมีไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ในส่วนผสมของคอนกรีต

1.5.2 สามารถนำสารปอซโซลานธรรมชาติที่หาได้ในประเทศ คือ ไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ มาผสมคอนกรีตให้มีกำลังอัดที่เหมาะสมและน้ำหนักเบา

1.5.3 ได้สัดส่วนผสมคอนกรีตที่น้ำหนักเบากว่าคอนกรีตทั่วไป

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ปัจจุบันคอนกรีตมวลเบาเป็นวัสดุก่อสร้างที่กำลังเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย ซึ่งมีวิธีการผลิตหลายรูปแบบ เช่น การใส่สารเคมีผสมเพิ่มเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศภายในคอนกรีต หากใช้ในสัดส่วนที่เหมาะสมกับการใช้งานสามารถรับกำลังอัดได้ตามมาตรฐาน หากนำไปใช้งานจะทำให้ลดการรับน้ำหนักของโครงสร้างหลักได้ โดยที่รู้จักกันคือ aerated concrete, cellular concrete หรือ gas concrete ระบบบอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (autoclaved system) ใช้พลังงานในการผลิตสูงต้องใช้เครื่องจักรในการผลิตและวิธีที่ได้รับความนิยมในการผลิตคอนกรีตมวลเบา คือ การใช้ส่วนผสมมวลรวมเบาจากธรรมชาติหรือจากกระบวนการผลิต (lightweight aggregate concrete)

ในอาคารสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ น้ำหนักส่วนหนึ่งที่ใช้คิดคำนวณหาขนาดเนื้อที่หน้าตัดและขนาดเหล็กเสริม เป็นน้ำหนักของตัวอาคารเอง ซึ่งถ้าหากสามารถทำให้ตัวอาคารมีน้ำหนักเบาขนาดของโครงสร้างย่อมมีขนาดเล็กลง ทำให้ประหยัดราคาก่อสร้างลงได้มาก คอนกรีตมวลเบาเป็นคอนกรีตที่ผลิตขึ้นเช่นเดียวกับคอนกรีตธรรมดา แต่ใช้วัสดุผสมที่มีน้ำหนักเบากว่า คอนกรีตมวลเบาที่ได้จากการใช้มวลรวมเบามีคุณสมบัติที่เด่นชัด คือ มีน้ำหนักเบา เป็นฉนวนความร้อน ต้านทานการแข็งตัวและการละลายตัวของน้ำและป้องกันไฟ (Demirboga, Orung, and Gul, 2001)

คอนกรีตมวลเบาเป็นนวัตกรรมความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการผลิตวัสดุก่อสร้าง ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้สอดคล้องกับการเจริญเติบโตของความต้องการปัจจัยพื้นฐานของมนุษย์ คือ ที่อยู่อาศัยและยังสอดคล้องกับความพยายามที่จะรักษาและใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

2.2 คอนกรีตมวลเบา

การพัฒนาคอนกรีตมวลเบาเริ่มต้นขึ้นโดยวิศวกรชาวสวีเดนในช่วงปี ค.ศ. 1920 ถึง 1932 เพื่อให้เป็นวัสดุฉนวนกันความร้อนสำหรับใช้ในงานก่อสร้างทั้งภายในและภายนอกอาคาร ข้อดีอื่นนอกเหนือจากความเป็นฉนวนกันความร้อน คือ สามารถติดตั้งหรือก่อสร้างได้ง่ายและเร็ว เพราะสามารถตัด ขัด และเจาะผลิตภัณฑ์คอนกรีตให้มีขนาดตามต้องการได้ด้วยอุปกรณ์ช่างทั่วไป

ชนิดของคอนกรีตมวลเบา

1) การจำแนกคอนกรีตมวลเบาตามหน่วยน้ำหนัก สามารถแยกได้ดังนี้

1.1) คอนกรีตมวลเบาชนิดทำเป็นฉนวน (insulating lightweight concrete) มีค่าหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 315 ถึง 1100 kg/m^3 และมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ระหว่าง 7 ถึง 70 ksc

1.2) คอนกรีตมวลเบาชนิดทำเป็นโครงสร้าง (structural lightweight concrete) มีค่าหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 1400 ถึง 1800 kg/m^3 และมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ไม่ต่ำกว่า 170 ksc

1.3) คอนกรีตชนิดกึ่งมวลเบา (semi - lightweight concrete) มีค่าหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 1800 ถึง 2050 kg/m^3 และมีค่ากำลังอัดไม่ต่ำกว่า 220 ksc โดยส่วนใหญ่จะนำมาทำเป็นคอนกรีตบล็อกสำหรับกำแพงรั้ว และใช้เป็นวัสดุทนไฟ

2) คอนกรีตมวลเบาที่ใช้วัสดุผสมเบา

วัสดุผสมเบามีลักษณะที่สำคัญ คือ มีความพรุนสูง ทำให้ความถ่วงจำเพาะมีค่าต่ำ วัสดุผสมนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ วัสดุผสมที่ได้จากธรรมชาติ เช่นหินพรุน (pumice) และ หินละลายชนิดเบา (scoria) และวัสดุที่ทำเทียมขึ้น เช่น หินดินดาน หินชนวนเผา และเพอร์ไลท์

3) คอนกรีตมวลเบาที่ใช้สารเคมี

คอนกรีตมวลเบาชนิดนี้ทำโดยใช้ผงด่างโลหะชนิดหนึ่งผสม (alkaline metal) เช่น ผงอลูมิเนียม (aluminum powder), ผงสังกะสี (zinc powder) หรือไฮโดรเจนเพอออกไซด์ (hydrogen peroxide) ซึ่งเป็นสารผสมเพิ่มชนิดทำให้เกิดก๊าซ (gas-forming admixture) ในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตพองตัวฟูขึ้น มีปริมาตรเพิ่มขึ้นกว่าเดิมหลายเท่า คอนกรีตที่ได้เรียกว่าโฟมคอนกรีต (aerated or foam concrete) โฟมคอนกรีตอาจผลิตโดยไม่มีทรายผสมอยู่ก็ได้ ซึ่งจะมีน้ำหนักเบากว่าน้ำถึงสามเท่า คือ หนักเพียง 200 ถึง 300 kg/m^3 ใช้ทำฉนวนกันความร้อน หากมีทรายผสมด้วยจะหนัก 500 ถึง 1100 kg/m^3 (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

2.3 วัสดุปอซโซลาน (pozzolan)

วัสดุปอซโซลาน หมายถึง วัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกา (SiO_2) หรืออลูมินาและซิลิกา (Al_2O_3 และ SiO_2) มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียดสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติและมีความชื้นเกิดเป็นสารประกอบซึ่งมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน (ASTM C 618, 2001)

เมื่อผสมวัสดุปอซโซลานในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แล้วได้ผลิตผลของปฏิกิริยาเคมีเป็นคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และคัลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ที่มีการก่อตัวและแข็งตัวเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การผสมวัสดุปอซโซลานซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นอกจากทำให้ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติใช้งานได้ดีแล้วยังทำให้ได้คอนกรีตที่มีราคาถูกลง

หลักการทำงานของปอซโซลาน (roles of pozzolan)

คุณสมบัติของคอนกรีตผสมปอซโซลาน โดยทั่วไปยังช่วยเพิ่มคุณสมบัติที่ดีของคอนกรีตหลายประการโดยเฉพาะอย่างยิ่งเรื่องความทนทานของคอนกรีต (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตโดยปอซโซลานกระทำได้ 2 ลักษณะ คือ

1) ทางเคมี

สารปอซโซลานนั้นเมื่อนำมาผสมซีเมนต์ ซิลิกาที่มีอยู่จำนวนมากในปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เราเรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิค (pozzolanic reaction) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งมีกำลังสูงและมีมวลมาก ส่งผลให้ปูนซีเมนต์ที่ผสมด้วยปอซโซลานมีกำลังเพิ่มขึ้น

ปฏิกิริยาปอซโซลานิค คือ การที่ซิลิคอนและ/หรืออลูมินาในสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกา ปฏิกิริยาปอซโซลานิค สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O \qquad (2.1)$$

และกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมินา ปฏิกิริยาปอซโซลานิค สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \longrightarrow 3CaO.\ 2Al_2O_3.\ 3H_2O \qquad (2.2)$$

ปฏิกิริยาปอซโซลานิคคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดชันโดยเฉพาะงานคอนกรีตหลา สารปอซโซลานที่มีอยู่ในเมืองไทยในปริมาณค่อนข้างมากและสามารถนำไปใช้งาน ได้แก่ เถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ เป็นต้น

2) ทางกายภาพ

สารปอซโซลานมีอนุภาคขนาดเล็กทำให้สามารถแทรกตัว (filler) เข้าไปในช่องว่างและรูพรุนขนาดต่าง ๆ กันในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นและกำลัง

สูงขึ้น นอกจากนี้อนุภาคที่กลมเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ความสามารถในการเทคอนกรีตผสมของปอซโซลานดีขึ้น

การเปรียบเทียบคุณสมบัติของปอซโซลานต่างชนิดกันสามารถทำได้โดยการวัดค่า Pozzolanicity (ASTM C 311, 1998) ซึ่งแสดงโดยสัดส่วนระหว่างกำลังของซีเมนต์ธรรมดาต่อกำลังของซีเมนต์ผสมด้วยปอซโซลาน

มาตรฐาน ASTM C 618 (2001) จำแนกปอซโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่

ก) ชั้นคุณภาพ N (class N) เป็นปอซโซลานจากธรรมชาติหรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านขบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ

ข) ชั้นคุณภาพ F (class F) เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (anthracite) หรือบิทูมินัส (bituminous) โดยมีปริมาณผลรวมของซิลิกา อลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) มากกว่า 70% และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ถึง 2.4 โดยทั่วไปเถ้าถ่านหินชั้นคุณภาพ F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ สำหรับซิลิกามาจากแร่ดินเหนียวและควอรตซ์ เนื่องจากถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าถ่านหินที่มีซิลิกาสูง สำหรับวิธีการเก็บตัวอย่างและการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ผลรวมของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (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. สารปอซโซลานชั้นคุณภาพ N เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ

2. สามารถใช้เถ้าถ่านหินชั้นคุณภาพ F ที่มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูงถึงร้อยละ 12 ได้ ถ้ามีผลของการใช้งานหรือผลของการทดสอบที่เชื่อถือได้

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของปอซโซลานเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C 618

ข้อกำหนดทางเคมีเพิ่มเติม	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่าโซเดียมออกไซด์ (Na_2O), ไม่เกินร้อยละ	1.5	1.5	1.5

หมายเหตุ : ปริมาณนี้จะใช้ระบุสำหรับคอนกรีตที่มีมวลรวมทำปฏิกิริยาและต้องใช้ซีเมนต์ที่มีปฏิกิริยาที่มีอัลคาไลไม่เกินกำหนด

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางกายภาพ ตามมาตรฐาน ASTM C 618

ข้อกำหนดทางกายภาพ	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ความละเอียด :			
- ปริมาณที่ค้างแร่งเบอร์ 325[A] ร่อนโดยใช้น้ำ ไม่เกินร้อยละ	34	34	34
ดัชนีกำลัง เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ :			
- ที่อายุ 7 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม	75[B]	75[B]	75[B]
- ที่อายุ 28 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม	75[B]	75[B]	75[B]
- ความต้องการน้ำ สูงสุดร้อยละของส่วนผสมควบคุม	115	105	105
ความคงตัว (soundness)[C] *:*			
- การขยายตัวหรือหดตัวออโตเคลฟ ไม่เกินร้อยละ	0.8	0.8	0.8
ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ[D] *:*			
- ความหนาแน่น ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5
- ร้อยละที่ค้างแร่งเบอร์ 325 ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5

หมายเหตุ : A ระวังไม่ให้มีผงละเอียดที่เกาะตัวกันเป็นก้อนค้างบนแร่ง

B เป็นไปตามข้อกำหนดเมื่อดัชนีกำลังที่อายุ 7 วัน หรือ 28 วัน เป็นไปตามข้อกำหนด

C ถ้ามีสารปอซโซลานผสมเกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ในคอนกรีต ชิ้นส่วนทดสอบของการขยายตัวออโตเคลฟควรมีสารปอซโซลานอยู่ร้อยละของสารซีเมนต์ตามนั้น

D ความหนาแน่น (density) และความละเอียดของตัวอย่างแต่ละอันต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้าหรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้าทั้งหมด ถ้าทดสอบไม่ถึง 10 ตัวอย่าง

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C 618

ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติม	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
แฟคเตอร์ผลคูณ (multiple factor) ของ LOI กับปริมาณที่ค้างแร่งเบอร์ 325 เมื่อร่อนโดยใช้น้ำ ไม่เกินร้อยละ		255	
การหดตัวแห้งเมื่ออายุ 28 วัน ที่เพิ่มขึ้นของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างมอร์ต้าร์ควบคุม ไม่เกินร้อยละ	0.3	0.3	0.3
ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ : เมื่อใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ปริมาณสารกักกระจายฟองอากาศที่ทำให้มีปริมาตรอากาศร้อยละ 18 จะต้องไม่แตกต่างจากค่าจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้าหรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้าทั้งหมด ถ้าทดสอบไม่ถึงสิบตัวอย่าง ไม่เกินร้อยละ	20	20	20
ประสิทธิภาพในการควบคุมปฏิกิริยาอัลคาไลของมวลรวม : การขยายตัวที่ 14 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์อัลคาไลต่ำ ไม่เกินร้อยละ	100	100	100
ประสิทธิภาพในการช่วยต้านทานสารซัลเฟต :* วิธีที่ 1 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ - สภาวะซัลเฟตปานกลาง 6 เดือน ไม่เกินร้อยละ - สภาวะซัลเฟตสูง 6 เดือน ไม่เกินร้อยละ วิธีที่ 2 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ - เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ทนซัลเฟตในสภาวะซัลเฟต 6 เดือน ไม่เกินร้อยละ	 0.10 0.05 100	 0.10 0.05 100	 0.10 0.05 100

หมายเหตุ : * ปริมาณมาณปอซโซลานที่ถือว่ามีประสิทธิภาพในการช่วยต้านซัลเฟตจะต้องอยู่ภายในร้อยละ ±2 ของการทดสอบหรือระหว่างสองค่าของการทดสอบที่อยู่ในเกณฑ์

ค) ชั้นคุณภาพ C (Class C) เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (lignite) หรือซับบิทูมินัส (subbituminous) เป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณผลรวมของซิลิกา อลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์มากว่า 50% มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงและมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุใน

มาตรฐาน ASTM C 618 เถ้าถ่านหินชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง สำหรับอลูมินามาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่ทีอลูมินาต่ำ ทำให้เถ้าถ่านหิน Class C นอกจากมีซิลิกาต่ำแล้วยังมีอลูมินาต่ำด้วย (ACI 232.2R-96, 2000)

วัสดุจำพวกปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีที่มาจาก 2 แหล่ง ได้แก่ ปอซโซลานจากธรรมชาติ (natural pozzolan) และปอซโซลานที่ได้จากขบวนการผลิต (artificial pozzolan) ปอซโซลานที่มาจากธรรมชาติ ได้แก่ ไดอะตอมมาเซียสเอิร์ธ (diatomaceous earth) เถ้าภูเขาไฟ เปลือกหอยและหินภูเขาไฟ วัสดุเหล่านี้เมื่อจะนำไปใช้งานจะต้องนำไปผ่านขบวนการต่าง ๆ ก่อนจึงจะนำไปใช้งานได้ เช่น การเผา การบดและการทำให้แห้ง เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำเอาปอซโซลานจากธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ในการสร้างเขื่อนและสะพาน เพื่อช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ ช่วยเพิ่มความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตและช่วยในการควบคุมปฏิกิริยาระหว่างด่างกับซิลิกา นอกจากนี้ยังมีผลพลอยได้ในการลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอีกทางหนึ่งด้วย

ปอซโซลานที่ได้จากขบวนการผลิต ได้แก่ เถ้าลอยที่เป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าเถ้าถ่านหิน เถ้าถ่านหินประกอบด้วยอนุภาคทรงกลมซึ่งมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบที่สำคัญประมาณ 66 ถึง 68% เถ้าถ่านหินบางชนิดสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับปูนขาวและด่าง เกิดเป็นสารประกอบที่มีแรงยึดประสาน แต่เถ้าถ่านหินบางชนิดก็สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและแข็งตัวได้เช่นเดียวกัน เถ้าถ่านหินโดยทั่วไปแล้วจะมีความละเอียดใกล้เคียงหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์เพียงเล็กน้อยโดยลักษณะทั่วไปจะเป็นรูปทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 μm จนถึง 0.15 mm

การวัดความละเอียดของเถ้าถ่านหินมี 2 วิธีที่นิยมใช้กันคือวิธีการร่อนผ่านแร่งเบอร์ 325 (ช่องเปิด 45 ไมโครเมตร) กับวิธีวัดพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักโดยวิธีของเบลน ในสหรัฐอเมริกาใช้วิธีร่อนผ่านแร่งเป็นวิธีมาตรฐานวิธีเดียวในการกำหนดความละเอียดของเถ้าถ่านหิน คือ เถ้าถ่านหินต้องมีขนาดของอนุภาคที่ร่อนผ่านแร่งเบอร์ 325 ไม่น้อยกว่า 66% โดยน้ำหนัก เถ้าถ่านหินที่ละเอียดขึ้นจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นและทำให้กำลังอัดคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถวัดได้โดยใช้ค่าดัชนีกำลัง (strength activity index) ดังสมการ

$$\text{ดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์} = [A/B] \times 100 \qquad (2.3)$$

โดยที่ A คือ กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหิน 20%

B คือ กำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐานซึ่งไม่มีเถ้าถ่านหินในส่วนผสม

มาตรฐาน ASTM C 618 ได้กำหนดค่าดัชนีกำลังของเถ้าถ่านหินทั้ง Class F และ Class C ต้องไม่ต่ำกว่า 75% ของมอร์ต้าร์มาตรฐานที่อายุ 7 หรือ 28 วัน

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ หลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันซิลิกาและอลูมินาที่อยู่ในเถ้าถ่านหินจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นแคลเซียมซิลิเกรตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต สารประกอบทั้งสองมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้นและเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุระหว่าง 7 ถึง 14 วัน และมีปฏิกิริยาไปเรื่อย ๆ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

2.4 ซิลิกาฟูม (silica fume)

ซิลิกาฟูมหรือไมโครซิลิกา (microsilica) หรือซิลิกาฟูมควบแน่น (condensed silica fume) เป็นชื่อเรียกวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมททัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นกระบวนการรีดักชันจากควอร์ต (quartz) ที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอนโดยวิธี electric arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2000°C ทำให้เกิดไอ (fume) ของ SiO ซึ่งต่อมาจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำได้เป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ขนาดที่เล็กมากที่ไม่เป็นผลึกและมีรูปร่างกลม ซิลิกาฟูมจะถูกดักจับในตัวดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุง

เนื่องจากซิลิกาฟูมมีอนุภาคที่เล็กมาก พื้นที่ผิวสูงมาก และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกจึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว ปัญหาของการใช้ซิลิกาฟูมในงานคอนกรีต คือส่วนผสมของคอนกรีตต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้ความข้นเหลวเท่าเดิมเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากของซิลิกาฟูม ทำให้พื้นที่ผิวสูงมากจึงต้องการน้ำในการหล่อลื่นพื้นที่ผิวของอนุภาคสูงขึ้นด้วย ซิลิกาฟูมจากโรงงานโลหะซิลิกอนและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นซิลิกาฟูมที่มีคุณภาพดีโดย 61 ถึง 98% ประกอบด้วยซิลิกอน ซึ่ง 85 ถึง 95% ของซิลิกอนดังกล่าวอยู่ในรูปไม่เป็นผลึกหรืออสัณฐานซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา ส่วนซิลิกาฟูมที่ได้จากโรงงานเฟอร์โรซิลิกอน มีคุณภาพต่ำกว่าโดยมีซิลิกอนเพียงประมาณ 50% และอยู่ในรูปของผลึกค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลให้การใช้ซิลิกาฟูมในงานคอนกรีตไม่ดีนัก

1) องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟูม คือ SiO_2 ซึ่งควรจะอยู่ในรูปไม่เป็นผลึก ส่วนใหญ่ซิลิกาฟูมที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมี SiO_2 มากกว่า 90% ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, Na_2O, K_2O และออกไซด์อื่น ๆ อีก 1 หรือ 2% ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของ SiO_2 หากนำค่าออกไซด์ของซิลิกาฟูม

มาเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหิน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก และดินขาวเผา จะพบว่ามีองค์ประกอบที่แตกต่างกันค่อนข้างมากดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของวัสดุประสาน (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)					
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหินแม่เมาะ	ตะกรันเตาถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟูม	เถ้าแกลบบด	ดินขาวเผา
SiO_2	20	48	37	92	90	55
Al_2O_3	5	26	11	0.7	0.5	40
Fe_2O_3	3	10	0.3	1.2	2	0.5
CaO	60	5	40	0.2	0.5	-
MgO	1.1	2	7	0.2	0.2	-
SO_3	2.4	0.7	0.3	-	1.5	-
ออกไซด์อื่น ๆ	1.5	1.3	2.3	2.6	-	-
LOI	2	3	-	-	4.7	-

2) คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูมที่เห็นชัดเจน คือ เป็นฝุ่นผงที่ละเอียดมากสีเทา เทาดำหรือเทาอมขาว แต่ถ้าเป็นซิลิกาฟูมควบแน่นจะมีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากการรวมตัวของซิลิกาฟูมหลาย ๆ อนุภาคเข้าด้วยกัน ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟูมมีค่าประมาณ 2.2 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 μm มีพื้นที่ผิวประมาณ 200000 ถึง 250000 cm^2/g ซึ่งใช้การทดสอบโดยวิธีดูดซับก๊าซไนโตรเจน (nitrogen absorption test) และถือว่ามีค่าสูงมาก (ขณะที่เถ้าถ่านหินมีค่าประมาณ 3000 ถึง 7000 cm^2/g ซึ่งทดสอบโดยวิธีของเบลน) ขนาดอนุภาคของซิลิกาฟูมเป็นขนาดที่เล็กมากเพราะมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 150 เท่าเพราะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 15 μm เนื่องจากซิลิกาฟูมมีขนาดเล็กมากจึงมีปัญหาในการขนย้าย เพื่อแก้ปัญหานี้จึงมีการนำซิลิกาฟูมมาอัดรวมกันเพื่อให้มีขาดใหญ่ขึ้นเรียกว่าซิลิกาฟูมควบแน่น สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบบด และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้แสดงเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบบด ตะกรันเตาถลุงเหล็ก และซิลิกาฟูม (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

คุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน แม่เมาะ	เถ้าแกลบ บด	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟูม
ความละเอียดของเบลน (cm^2/g)	3400	3500	8000	3500	200000*
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.0	2.2	2.9	2.2
สี	เทา	เทาอ่อนจนถึงเทาเข้มหรือสีน้ำตาล	เทาถึงเทาดำ	เทา	เทาอมขาวจนถึงเทาดำ

หมายเหตุ : * วิธีเบลนไม่สามารถใช้วัดความละเอียดของซิลิกาฟูมได้ แต่ใช้วิธี nitrogen absorption แทน

3) การใช้ซิลิกาฟูมในงานคอนกรีต

โดยทั่วไปซิลิกาฟูมจะใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ 5 ถึง 10% โดยน้ำหนัก การผลิตปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูมมีใช้ในประเทศแคนนาดาโดยผสมซิลิกาฟูมในส่วนผสมราว 7 ถึง 8% เนื่องจากซิลิกาฟูมมีความละเอียดสูงมากจึงมีปัญหาในเรื่องการขนส่งและการใช้งานพอสมควรเพราะฟุ้งกระจายได้ง่าย ดังนั้นจึงมีการใช้ซิลิกาฟูมที่ผสมน้ำให้อยู่ในรูปของของเหลวข้น อย่างไรก็ตามคอนกรีตผสมเสร็จหลายแห่งยังคงนิยมใช้ซิลิกาฟูมในรูปผงซึ่งอาจเป็นปัญหาเรื่องสุขภาพได้เพราะมีการฟุ้งกระจายของซิลิกาฟูมได้ง่าย ดังนั้น The American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) ได้ระบุให้ซิลิฟูมเป็นสารอันตราย (hazardous material) และไม่ควรมีฝุ่นของซิลิกาฟูมในอากาศมากกว่า 2 mg/m^3 และควรใช้หน้ากากกันฝุ่นสวมป้องกันในขณะทำงาน การใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นแทนซิลิกาฟูมจะสามารถแก้ปัญหานี้ได้เพราะซิลิกาฟูมควบแน่นมีขนาดใหญ่กว่าซิลิกาฟูมมากและไม่ปลิวลมง่ายนัก

4) ผลกระทบของซิลิกาฟูมต่อคอนกรีตสด

เนื่องจากซิลิกาฟูมมีความละเอียดสูงมาก ซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟูมที่ความข้นเหลวปกติจะต้องการน้ำสูงขึ้นและจะทำให้เวลาก่อตัวนานขึ้น เมื่อใช้ผสมทำมอร์ต้าร์และคอนกรีตทำให้ต้องการปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น แนวทางแก้ไขคือการใช้สารลดน้ำหรือสารลดน้ำพิเศษเข้าช่วยเพื่อไม่ให้ปริมาณในส่วนผสมคอนกรีตสูงเกินไป เพราะการใช้น้ำในส่วนผสมมากจะทำให้คอนกรีตมีกำลังต่ำ ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ให้กำลังรับแรงสูงจะอยู่ที่ประมาณ 3% โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ ส่วนการเยิ้มน้ำในคอนกรีตที่มีซิลิกาฟูมพบว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต

ธรรมดา เนื่องจากซิลิกาฟูมมีความละเอียดสูงและทำปฏิกิริยาได้ว่องไว จึงมีความร้อนจากปฏิกิริยาค่อนข้างมาก

5) ผลกระทบของซิลิกาฟูมต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ซิลิกาฟูมนิยมใช้เป็นส่วนผสมหนึ่งในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงมาก เช่นกำลังอัดเท่ากับ 1200 ksc ที่อายุ 90 วัน โดยการใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษ คอนกรีตที่ได้นอกจากจะมีกำลังอัดที่สูงมากแล้วยังมีค่าการซึมผ่านน้ำที่ต่ำมาก เพราะซิลิกาฟูมจะไปอุดโพรงซีเมนต์เพสต์การใช้ซิลิกาฟูมที่เหมาะสมแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต จะมีประสิทธิภาพเหมือนใช้ปูนซีเมนต์ถึง 3 หรือ 4 เท่า เช่นใช้ซิลิกาฟูม 1 กิโลกรัม แทนที่ปูนซีเมนต์ 3 หรือ 4 กิโลกรัม ในคอนกรีตแต่ยังคงให้คอนกรีตที่มีกำลังอัดที่ 7 หรือ 28 วันเท่ากัน กำลังอัดของคอนกรีตที่มีซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ 0, 10, 15 และ 20% มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อายุ 28 วันค่อนข้างมากดังแสดงในตารางที่ 2.7 แต่คอนกรีตเหล่านี้เมื่อมีอายุครบ 5 ปี กลับพบว่า คอนกรีตที่มีซิลิกาฟูมมาก คือ 15 และ 29% มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาและที่ใส่ซิลิกาฟูม 10% แสดงให้เห็นว่าการใช้ซิลิกาฟูม 10% ของวัสดุประสานจะให้ค่ากำลังอัดดีทั้งที่อายุเริ่มแรกและที่อายุมากขึ้น

ตารางที่ 2.7 อัตราส่วนผสมและกำลังอัดของคอนกรีตที่มีและไม่มีซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสม (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

ส่วนผสมที่	อัตราส่วนผสม (kg/m^3)					สารลดน้ำพิเศษ (ml/binder 1 kg)	ค่ายุบตัว (mm)	กำลังอัด (ksc)	
	ปูนซีเมนต์	ซิลิกาฟูม	ทราย	หิน	น้ำ			28 วัน	5 ปี
1	401	0	729	1211	141	16.1	75	567	877
2	361	40	725	725	141	18.2	75	721	812
3	341	60	719	719	140	21.4	60	767	700
4	320	80	716	716	139	26.2	60	757	717

การใช้ซิลิกาฟูมในงานคอนกรีตช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต การแทรกซึมของคลอไรด์ การกัดกร่อนเนื่องจากน้ำเค็มหรือน้ำทะเล รวมถึงการเพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา การที่คอนกรีตผสมซิลิกาฟูมมีคุณสมบัติดังกล่าวดีขึ้นอาจเนื่องมาจากซิลิกาฟูมทำให้คอนกรีตมีการซึมผ่านน้ำต่ำและโพรงของซีเมนต์เพลส์มีขนาดเล็กลง การใช้ซิลิกฟูม 5 หรือ 10% สามารถลดค่าความพรุนและ

เพิ่มปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมมีคุณภาพดีขึ้นกว่าซีเมนต์เพสต์ธรรมดา

ปัจจุบันนิยมใช้ซิลิกาฟูมในการทำคอนกรีตกำลังสูงและเพื่อเพิ่มความทนทานของคอนกรีตเป็นหลัก สิ่งควรระมัดระวังให้มาก คือ การผสมซิลิกาฟูมในคอนกรีตควรมีความสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งคอนกรีต ควรทำการตรวจสอบว่าซิลิกาฟูมสามารถใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษที่ใช้อยู่เป็นประจำได้ดี เพื่อที่จะได้ไม่ต้องใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตมากเกินไป ข้อสำคัญอีกข้อหนึ่ง คือ ควรทำการตรวจสอบทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วย เพราะซิลิกาฟูมมีราคาแพงกว่าปูนซีเมนต์มากเพราะยังไม่สามารถผลิตขึ้นใช้ได้ภายในประเทศไทย กล่าวคือ ในประเทศไทยราคาของซิลิกาฟูมสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประมาณ 10 ถึง 15 เท่า

2.5 ปอซโซลานธรรมชาติ (natural pozzolan)

วัสดุปอซโซลานธรรมชาติได้ถูกนำมาใช้หลายร้อยปีมาแล้ว คำว่าปอซโซลานมาจากเถ้าภูเขาไฟของหมู่บ้านปอซซูลิ (Pozzuoli) ใกล้กับเมืองเนเปิล ประเทศอิตาลี เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟวิซูเวียส (Vesuvius) ในปีคริสตศักราช 79 แต่อย่างไรก็ตามเมื่อ 2000 ปีก่อนคริสตศักราช ได้มีการนำเถ้าภูเขาไฟและดินเผา (calcined clay) มาใช้ในงานก่อสร้างมากมายที่โรม กรีก อินเดีย และอียิปต์ โดยโครงสร้างคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานยังคงสามารถยืนหยัดให้เห็นได้จนถึงปัจจุบันนี้เป็นหลักฐานด้วยความทนทานของการใช้วัสดุปอซโซลาน

ในตอนต้นศตวรรษที่ 20 มีการนำวัสดุปอซโซลานธรรมชาติมาใช้ในอเมริกาเหนือในโครงการก่อสร้างสาธารณูปโภค เช่น การสร้างเขื่อน ซึ่งการใช้วัสดุปอซโซลานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตขนาดใหญ่และเป็นการเพิ่มปริมาณวัสดุซีเมนต์ นอกจากการใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อควบคุมความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นแล้ว วัสดุปอซโซลานยังช่วยเพิ่มความต้านทานต่อซัลเฟตอีกด้วย วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุชนิดแรกที่พบว่าช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกาในคอนกรีต

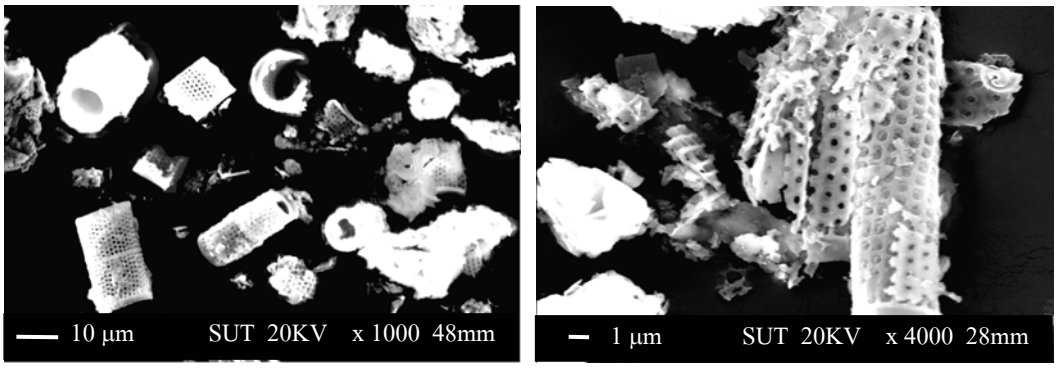
วัสดุปอซโซลานจากธรรมชาติถูกจำแนกโดยมาตรฐาน ASTM C 618 โดยจำแนกเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้นซึ่งได้กำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ ในปัจจุบันวัสดุปอซโซลานธรรมชาติส่วนใหญ่จะผ่านการปรับปรุง เช่น กระบวนการให้ความร้อนในเตาเผาและบดเป็นผงละเอียด ซึ่งอาจเป็นดินเผา ดินดานเผาและดินขาว เป็นต้น

2.5.1 ไดอะตอมไมท์ (diatomite)

ไดอะตอมไมท์คือชื่อเรียกทางวิทยาแร่ของดินเบา (diatomaceous earth) หรือดินไดอะตอม คือ ดินซึ่งเกิดจากการทับถมของซากไดอะตอม ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวขนาดเล็กมาก ตั้งแต่ 2 ถึง 2000 ไมครอน มีผนังเป็นฝาซิลิกาประกบกัน ไดอะตอมพบได้ในแหล่งน้ำทั่วโลก ทั้งน้ำจืด น้ำกร่อยและน้ำเค็ม มีอยู่ประมาณ 12000 ถึง 16000 ชนิด บางชนิดว่ายน้ำได้ แต่บางชนิดต้องอาศัยกระแสน้ำพัดพาไป เมื่อตายลงเปลือกที่เป็นซิลิกาจะตกตะกอนทับถมกันเป็นจำนวนมากจนเกิดเป็นแหล่งไดอะตอม ลักษณะของไดอะตอมไมท์แสดงในรูปที่ 2.1

ดินเบามีโครงสร้างประกอบด้วยโพรงเล็ก ๆ อยู่ทั่วไป มีเนื้อซุยพรุนคล้ายชอล์ก และมีปริมาณซิลิกาสูงถึงประมาณ 85% ขึ้นไป ในประเทศไทยจะพบดินเบามากแถบจังหวัดลำปาง ในทวีปแอฟริกาตอนเหนือพบที่เมืองทริโปลี ในประเทศเยอรมนีพบที่เมืองฮาโนเวอร์และที่สหรัฐอเมริกามีการผลิตดินเบามากในมลรัฐโอเรกอน แคลิฟอร์เนีย วอชิงตัน ไอดาโฮ และเนวาดาเป็นต้น

ในการผลิตดินเบาจากแหล่งไดอะตอมจะถูกนำมาบดและเผาให้เป็นเถ้า โดยจะมีความละเอียด และความบริสุทธิ์แตกต่างกันไป ดินเบาที่บริสุทธิ์จะมีสีขาวแต่ถ้ามีสิ่งเจือปนจะมีสีเทาหรือสีออกน้ำตาลหรือเขียว มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 192 ถึง 272 kg/m^3 มีปฏิกิริยาทางเคมีเชื่องช้าและเป็นตัวนำความร้อนได้ไม่ดี



รูปที่ 2.1 ภาพขยายของไดอะตอมไมท์ (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)

ดินเบาใช้ประโยชน์ได้หลายอย่างดังนี้

ก) ใช้เป็นสารขัดถู (abrasive) สำหรับขัดภาชนะโลหะได้ดี เพราะมีซิลิกาขนาดละเอียดมากปนอยู่

ข) ใช้ในการกรอง (filtering) เช่น กรองน้ำตาลและสารอื่น ๆ แท่งดินเบา (diatomite block) จะมีความพรุนสูงถึง 90% ของปริมาตรแท่งจึงมี คุณสมบัติในการกรองได้ดี

ค) ใช้เป็นตัวเติม (filler) ในการผลิตสีและการขึ้นรูปพลาสติก

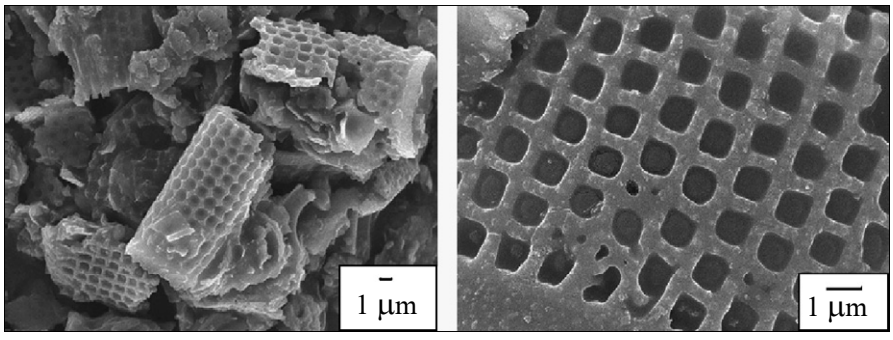
ง) ใช้เป็นส่วนผสมในการทำกระดาษเพื่อให้เนื้อกระดาษแน่นเนียน เช่น ในการทำกระดาษสา เป็นต้น

จ) ใช้เป็นฉนวน โดยนำมาอัดเป็นก้อน (block) หรือเป็นแผ่น สามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 371°C และบางชนิดเมื่อนำมาสร้างพันธะกับใยหิน (asbestos) จะทนอุณหภูมิได้สูงถึง 1038°C

ฉ) ใช้เป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สำหรับใช้ในงานประเภทที่ต้องอาศัยความละเอียดและใช้กันน้ำ

ช) ใช้แทนซิลิกาในน้ำเผาเคลือบเครื่องปั้นดินเผา

Kedsarin Pimraksa and Prinya Chindaprasirt (2008) ได้ศึกษาคุณสมบัติของอิฐมวลเบาที่มีไดอะตอมไมท์จากแหล่งลำปาง (ซึ่งมีปริมาณมากถึง 100 ล้านตัน) ปูนขาวและยิปซัมเป็นส่วนผสม พบว่าไดอะตอมไมท์จากแหล่งลำปางมีคุณสมบัติในการเป็นสารปอซโซลานและสามารถนำมาทำอิฐมวลเบาได้เนื่องจากมีซิลิกาและอลูมินาสูง มีความพรุนสูง เช่นเดียวกับสารปอซโซลานธรรมชาติทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และตารางที่ 2.8

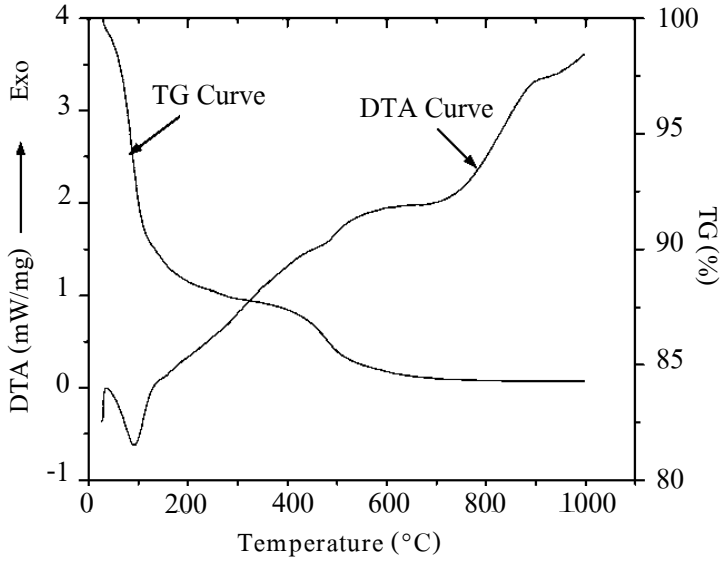


รูปที่ 2.2 ภาพถ่าย SEM ของไดอะตอมไมท์จากแหล่งลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008)

ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของไดอะตอมไมท์จากแหล่งลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008)

ออกไซด์	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	TiO_2	P_2O_5	SO_3
ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)	77.5	14.2	5.2	2.1	0.2	0.0	0.5	0.5	0.3	0.0

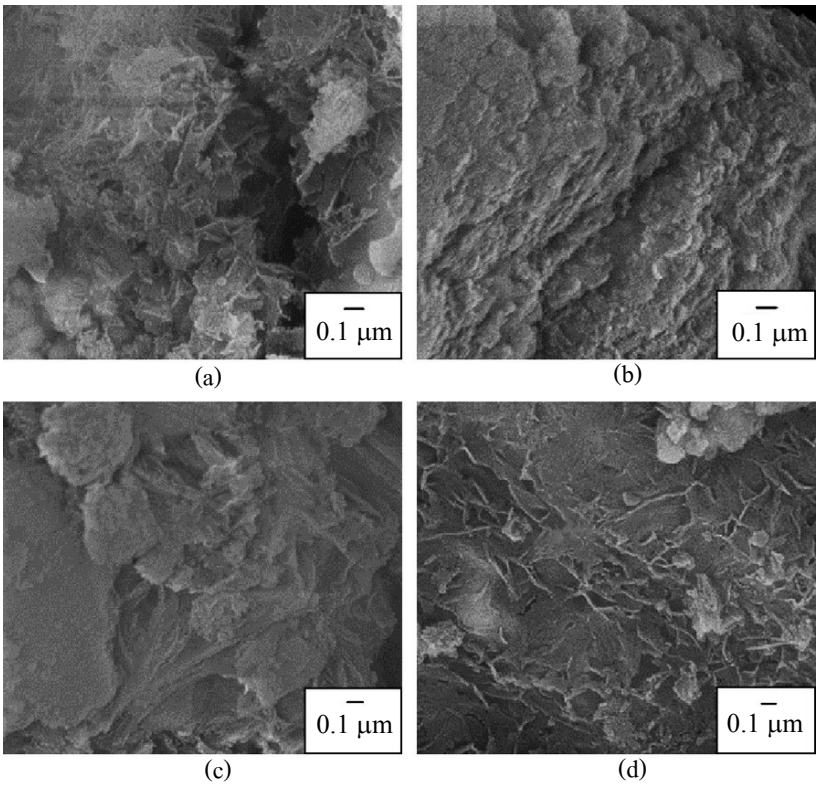
จากตารางที่ 2.8 ปริมาณออกไซด์หลัก SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มีค่า 77.5, 14.6 และ 5.24% ตามลำดับ จัดเป็นปอซโซลานธรรมชาติ Class N ตามการจำแนกตามมาตรฐาน ASTM C 618 และจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) จะเห็นอนุภาคที่มีลักษณะแบบทรงกระบอก ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) ประมาณ 32 μm ผนังเป็นตารางคล้ายรังผึ้ง ขนาดช่องประมาณ 1μm มีพื้นที่ผิวที่สูงถึง 17000 m^2/kg ซึ่งทำให้ไดอะตอมไมท์มีน้ำหนักเบาและมีความพรุนสูง จากกราฟ Differential Thermal Analysis (DTA) และ Thermal Gravity Analysis (TGA) แสดงในรูปที่ 2.3 ไดอะตอมไมท์จากแหล่งลำปางที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500°C มีน้ำหนักที่เบาลง มีค่าการสูญเสียน้ำหนักในช่วง 450 ถึง 500°C และจะค่อย ๆ คงที่เมื่ออุณหภูมิเกินกว่า 500°C โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.7



รูปที่ 2.3 กราฟ DTA และ TGA ของไดอะตอมไมท์ลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008)

ในการศึกษาได้นำไดอะตอมไมท์มาผสมกับปูนขาว 15% และยิปซัม 5% เตรียมแบบหล่อตัวอย่างขนาด 3.5×7.5×15 cm ใช้เครื่องอัดเข้าแบบที่มีแรงกดอัดประมาณ 35 ksc บ่มที่อุณหภูมิห้องระหว่าง 27 ถึง 28°C โดยแปรผันระยะเวลาการบ่มที่ 3, 5, 6, 7 และ 11 วัน บ่มด้วยตู้อบไอน้ำความดันสูง (autoclave) ที่ความดันประมาณ 0.14 MPa อุณหภูมิ 130°C ต่ออีก 4 ชั่วโมง พบว่าส่วนผสมที่มีปริมาณความชื้น 50% ได้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด 147.8 ksc มีหน่วยน้ำหนัก 1020 kg/m^3 ที่อายุการบ่ม 6 วัน แต่เมื่อวิเคราะห์ปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่านี้จะให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำลง

เมื่อพิจารณาค่ากำลังอัดและจากภาพถ่าย SEM ของอิฐที่ทำการแปรผันการเผาไดอะตอมไมท์ที่อุณหภูมิ 0, 200, 350, 500 และ 700°C แสดงในรูปที่ 2.4 พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาไดอะตอมไมท์ที่สามารถทำให้ได้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด คือ 500°C มีค่ากำลังอัด 178.4 ksc หน่วยน้ำหนัก 730 kg/m^3 มีโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ดีที่สุด อย่างไรก็ตามในการทำอิฐที่มีส่วนผสมของไดอะตอมไมท์ที่ไม่ได้ผ่านการเผาเลยก็สามารถทำได้ โดยมีค่ากำลังอัดประมาณ 147.8 ksc และมีหน่วยน้ำหนัก 880 kg/m^3 ดังแสดงในตารางที่ 2.9

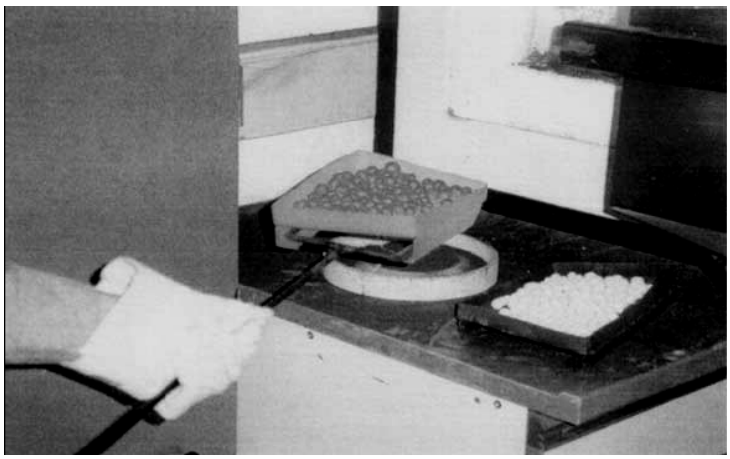


รูปที่ 2.4 ภาพถ่าย SEM ของอิฐที่ทำการแปรผันอุณหภูมิในการเผาไดอะตอมไมท์ : (a) 200°C (b) 350°C (c) 500°C และ (d) 700°C (Kedsarin Pimraksa, 2008)

ตารางที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิการเผา หน่วยน้ำหนัก และกำลังอัดประลัย (Kedsarin Pimraksa, 2008)

อุณหภูมิการเผา (°C)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)	กำลังอัดประลัย (ksc)
ไม่เผา	880	147.8
200	760	152.9
350	790	158.0
500	730	178.4
700	760	127.4

Fragoulisa et al. (2004) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุผสมคอนกรีตมวลเบาซึ่งใช้ไดอะตอมไมท์จากประเทศกรีซเป็นส่วนผสมในการผลิตมวลรวมเบา (production of lightweight aggregates, LWAs) โดยการนำไดอะตอมไมท์ 20 กิโลกรัมผสมกับขี้เลื่อยดิบที่มีขนาดเล็กกว่า 1 mm ในปริมาณ 2, 3.5 และ 5% ใช้ปริมาณน้ำต่อขี้เลื่อยดิบ (w/s) ≤ 0.5 จากนั้นปั้นเป็นก้อนกลม (pellets) ขนาด 5 ถึง 20 mm แสดงในรูปที่ 2.5 นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วเผาที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 12 ถึง 15 นาที ทำการทดสอบกำลังอัดเปรียบเทียบกับ LWAs ของประเทศเยอรมันและเดนมาร์ก



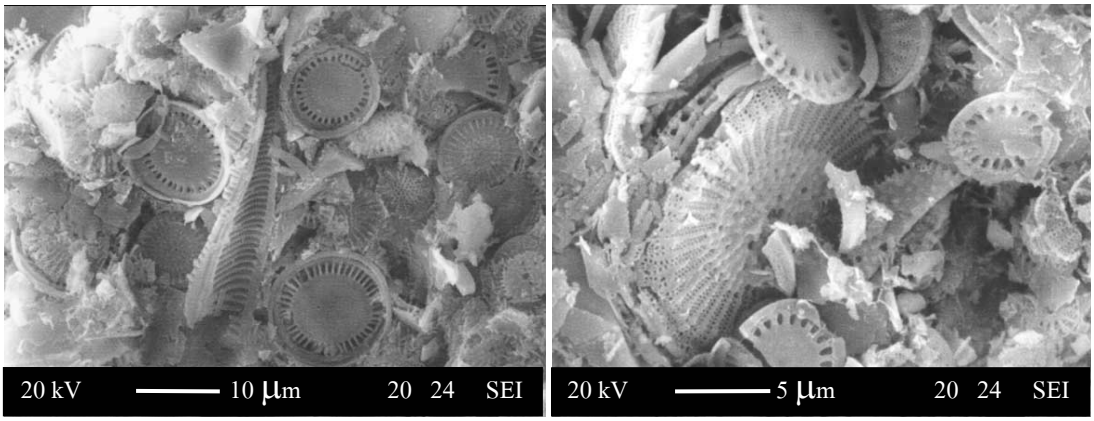
รูปที่ 2.5 ผลิตภัณฑ์มวลรวมเบา (production of lightweight aggregates, LWAs) (Fragoulisa et al., 2004)

จากการทดสอบ X-Ray Fluorescence ของไดอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ เยอรมัน และเดนมาร์ก แสดงในตารางที่ 2.10 พบว่ามีปริมาณออกไซด์หลัก SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันมากกว่า 70% โดยน้ำหนัก มีค่า LOI ไม่มากกว่า 10% ซึ่งค่า LOI ที่สูญเสียไปนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียน้ำเนื่องจากการเผา เพราะไดอะตอมไมท์เกิดขึ้นจากการทับถมเป็นเวลานานจึงมีส่วนประกอบของดินเหนียวปะปนอยู่ รวมทั้งผนังเซลล์ของไดอะตอมที่ประกอบด้วยซิลิกาที่มีปริมาณน้ำปะปนอยู่ด้วย และจะมีปริมาณมากหรือน้อยนั้นจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของผนังเซลล์

ตารางที่ 2.10 องค์ประกอบทางเคมีของไดอะตอมไมท์ประเทศกรีซ เยอรมัน และเดนมาร์ก (Fragoulisa et al., 2004)

ปริมาณออกไซด์ (%)	กรีซ	เยอรมัน	เดนมาร์ก
Na_2O	1.5	1.3	0.2
K_2O	2.2	3.6	2.4
CaO	3.2	1.5	6.5
MgO	1.8	1.5	4.5
MnO	-	-	-
Fe_2O_3	12.3	22.2	32.9
TiO_2	-	-	2.2
Al_2O_3	18.2	26.2	15.4
SiO_2	60.8	44.1	35.8
P_2O_5	-	-	-
LOI	7.4	-	-
Total	100.1	100.3	99.9

ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของไดอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ รูปแบบของผนังเซลล์ที่ประกอบด้วยซิลิกานั้นค่อนข้างสมบูรณ์ มีลักษณะทรงกระบอก แบบจาน มีขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 5 ถึง 30 μm แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ภาพถ่าย SEM ของไดอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ (Fragoulisa et al., 2004)

ตัวอย่าง LWAs ของประเทศกรีซที่ผ่านการเผาแล้วส่วนใหญ่จะยังคงรูปร่างเป็นทรงกลมเช่นเดิม มีสีน้ำตาลแดง เป็นเนื้อเดียวกันทั้งก้อน แต่มีบางก้อนที่มีลักษณะคล้ายหัวกะหล่ำปลี จากการเผาทำให้ pellets บางก้อนขยายตัวเป็นรูเล็ก ๆ หรือมีรอยแยกเล็ก ๆ ที่ผิว จากผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัดและความหนาแน่นพบว่ามีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกับ LWAs ของประเทศเยอรมันและเดนมาร์ก แต่ในอัตราส่วนที่ใช้ไดอะตอมไมท์ 20 kg ขี้เลื่อยดิบ 5% อัตราส่วน w/s น้อยกว่า 0.5 สามารถรับแรงอัดได้ 2029 g มีค่าความหนาแน่น 0.9 g/cm^3 ค่าความหนาแน่นที่ได้จะสูงกว่าและสามารถรับกำลังอัดได้ดีกว่า LWAs ของประเทศเยอรมันและเดนมาร์ก คือ LWAs ของประเทศเดนมาร์กและเยอรมัน สามารถรับแรงได้เพียง 986 g และ 580 g มีความหนาแน่น 0.7 g/cm^3 และ 0.7 g/cm^3 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความสามารถในการรับแรงอัดกับค่าความหนาแน่นแล้ว LWAs ของประเทศกรีซ มีคุณสมบัติในการรับแรงอัดที่ดีกว่า LWAs ของประเทศเยอรมันและเดนมาร์กที่ขนาดเท่ากัน คือ ที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ถึง 10 mm ความพรุนจะมีค่าลดต่ำลงและมีการกระจายตัวของช่องว่างที่ดีกว่า ลักษณะของโพรงมีทั้งขนาดเล็กแบบเหลี่ยมคมและกลมมนคล้ายรังผึ้ง มีขนาดตั้งแต่ 2 μm ไปจนถึง 500 μm และมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Kedsarin Pimraksa (2008) ทำให้ทราบว่าไดอะตอมไมท์ในแต่ละแหล่งจะมีปริมาณออกไซด์หลักและรูปร่างแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับระยะเวลาการทับถม แหล่งกำเนิด และชนิดของไดอะตอม ดังนั้นในการศึกษาควรคำนึงถึงทั้งลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของไดอะตอมไมท์ในแต่ละแหล่งกำเนิด รวมถึงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติที่ดีของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

Aydin and Gul (2007) ได้ศึกษาผลกระทบของระยะเวลาการก่อตัวและคุณสมบัติเชิงกลบางประการของคอนกรีตที่เกิดจากการนำวัสดุธรรมชาติที่ได้จากการระเบิดของภูเขาไฟมาใช้ในส่วนผสม โดยใช้ไดอะตอมไมท์จากประเทศตุรกีแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ปริมาณ 1, 2 และ 4% ควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ 300 kg/m^3 ค่ายุบตัวเฉลี่ย 5 cm ทำการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของไดอะตอมไมท์เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แสดงในตารางที่ 2.11 พบว่าไดอะตอมไมท์มีปริมาณสารประกอบหลัก SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เมื่อรวมกันแล้วมีค่ามากกว่า 70% โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติในการเป็นวัสดุปอซโซลาน

ตารางที่ 2.11 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของไดอะตอมไมท์ประเทศตุรกีกับปูนซีเมนต์ (Aydin and Gul, 2007)

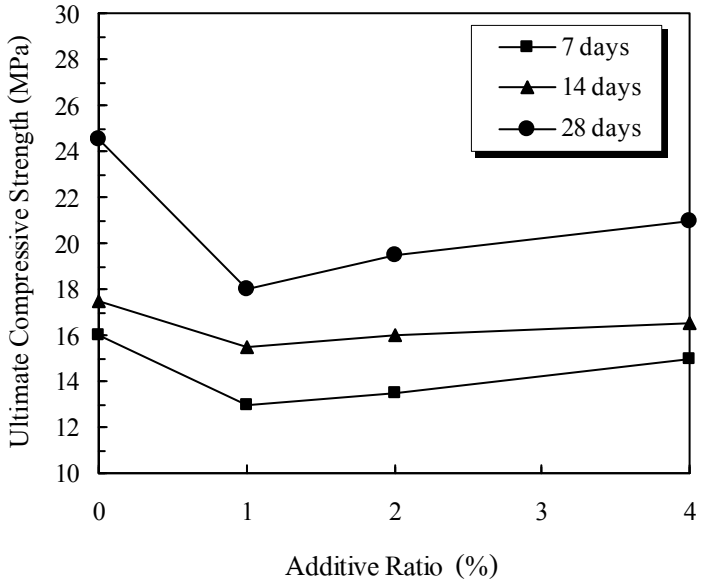
ออกไซด์	ปูนซีเมนต์ (%)	ไดอะตอมไมท์ (%)
SiO_2	17.7	77.1
Al_2O_3	3.6	1.6
Fe_2O_3	5.9	3.9
CaO	57.7	2.0
MgO	3.4	1.2
SO_3	2.6	-
K_2O	0.3	-
TiO_2	0.2	-
LOI	2.5	4.4

จากข้อมูลผลการทดสอบของ Aydin and Gul (2007) ด้านกำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต แสดงในรูปที่ 2.7 และ 2.8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณ 1, 2 และ 4% ทำให้ค่ากำลังอัดลดลงเหลือเพียง 73.5, 79.6 และ 85.7% ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเหลือ 90.9, 96.6 และ 98.3% ที่อายุการบ่ม 28 วันของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับปริมาณการผสมเพิ่มทั้งสาม พบว่าค่ากำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณไดอะตอมไมท์เพิ่มขึ้น และมีการพัฒนากำลังอัดแปรผันตามอายุการบ่ม เนื่องจากปริมาณซิลิกา (SiO_2) ของไดอะตอมไมท์ ที่มีอยู่ในส่วนประกอบมากถึง 77.1% ที่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในช่วงอายุการบ่มที่สูงขึ้นและยังพบอีกว่าการเพิ่มปริมาณไดอะตอมไมท์จะส่งผลให้ความต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้น และทำให้ระยะเวลาการก่อตัว

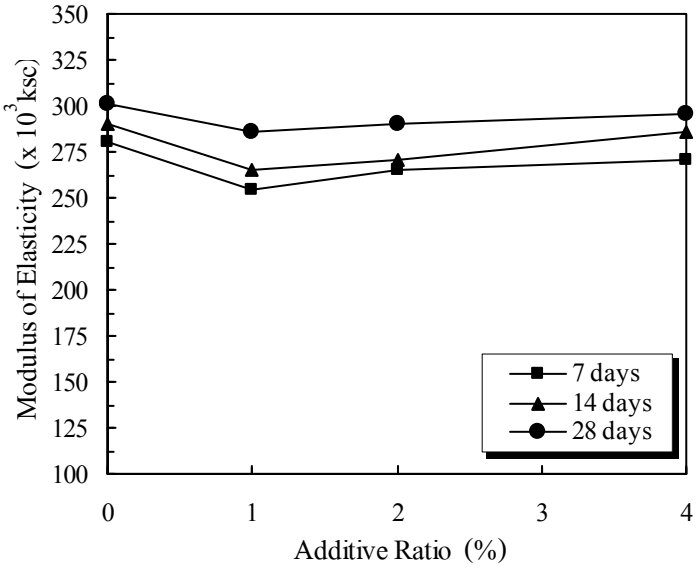
ขั้นต้นและขั้นปลายสูงขึ้นเนื่องจากไดอะตอมไมท์มีพื้นที่ผิวมากและอนุภาคค่อนข้างละเอียด ดังแสดงในตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นและขั้นปลายของคอนกรีตผสมไดอะตอมไมท์ (Aydin and Gul, 2007)

การผสมเพิ่ม (%)	ระยะเวลาการก่อตัว (min)	
	ขั้นต้น	ขั้นปลาย
1	108	130
2	125	154
4	261	237



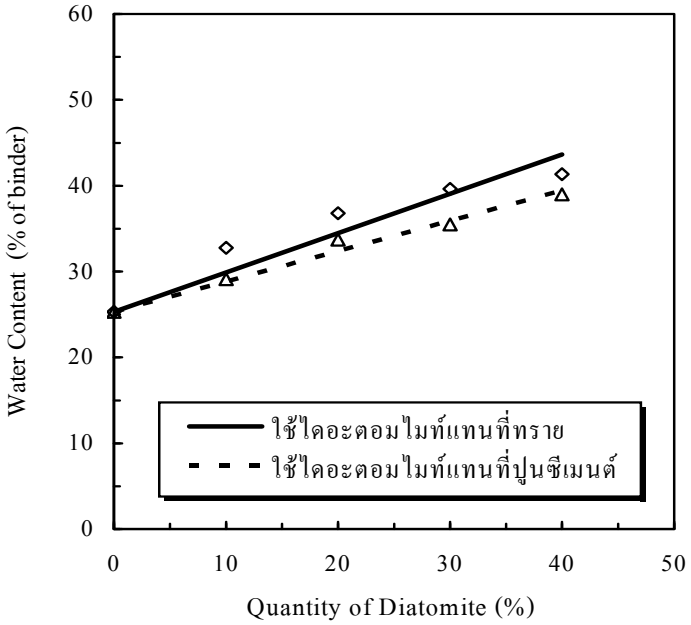
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์กำลังอัดของคอนกรีตกับเปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม (Aydin and Gul, 2007)



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกับเปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม (Aydin and Gul, 2007)

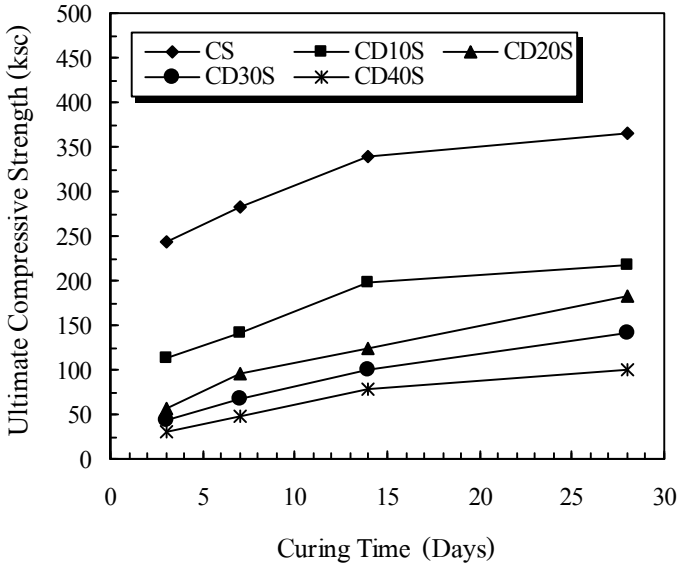
ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (2550) ได้ทำการศึกษาการใช้ไดอะตอมไมท์ในงานคอนกรีตมวลเบา ศึกษาโดยการใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ทรายและปูนซีเมนต์ 0, 10, 20, 30 และ 40% และได้พบว่า ถ้าต้องการควบคุมปริมาณน้ำที่ทำให้คอนกรีตมวลเบามีค่าการไหลแผ่ 105 ถึง 115% นั้น ต้องคำนึงถึงปริมาณในการแทนที่ด้วย เนื่องจากปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นของไดอะตอมไมท์จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเพิ่มปริมาณน้ำ การแทนที่ทรายในส่วนผสมส่งผลให้มีความต้องการปริมาณน้ำมากกว่าการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ เนื่องจากปริมาณทรายในส่วนผสมมีถึง 2.75 เท่าของปริมาณปูนซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9

การแทนที่ทรายและปูนซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์มีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 4.6 และ 3.8% ทุกปริมาณการแทนที่ 10% ตามลำดับ ถึงแม้การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำจะส่งผลดีต่อความสามารถเทได้ แต่จะมีผลเสียโดยตรงต่อกำลังอัด เนื่องจากค่าปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ากำลังอัดลดลง และเมื่อทำการวิเคราะห์ถึงผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์ในส่วนผสม ดังแสดงในรูปที่ 2.10



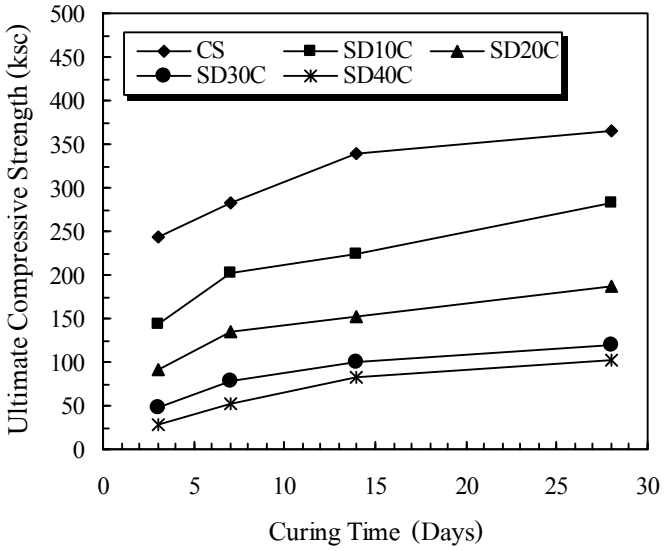
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ปริมาณน้ำกับปริมาณไดอะตอมไมท์ (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)

กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ทรายมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ทรายมีค่าสูงที่สุด 218 ksc และมีค่าน้อยที่สุด 100 ksc เมื่อใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ทราย 10 และ 40% ซึ่งมีค่าลดลง 40.4 และ 72.6% ของคอนกรีตควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ



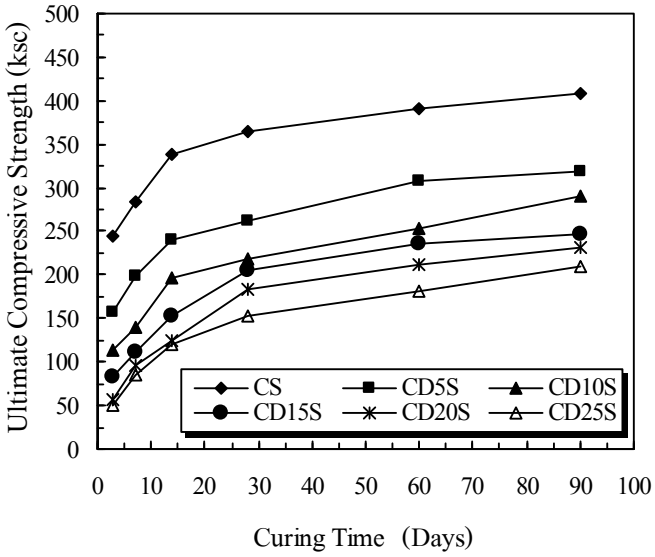
รูปที่ 2.10 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ทราย (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)

ส่วนค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์มีลักษณะคล้ายกับการแทนที่ด้วยทราย โดยมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นคล้ายกับคอนกรีตควบคุมตามอายุการบ่มเช่นกัน ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์มีค่าสูงที่สุด 283 ksc และมีค่าน้อยที่สุด 102 ksc เมื่อใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 10 และ 40% ซึ่งมีค่าลดลง 22.6 และ 72.1% ของคอนกรีตควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



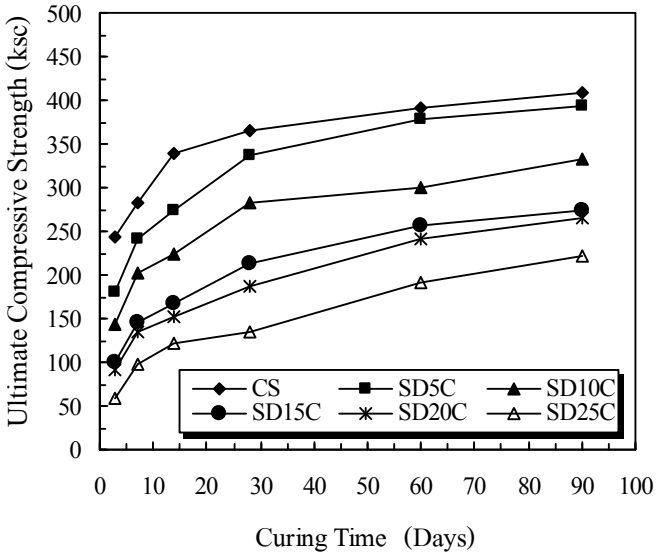
รูปที่ 2.11 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์
(ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)

ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (2550) ยังได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไดอะตอมไมท์มาใช้เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มในงานคอนกรีต โดยนำไดอะตอมไมท์แทนที่ทราย แทนที่ปูนซีเมนต์ และผสมเพิ่ม ที่ปริมาณ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และควบคุมอัตราการไหลแผ่ที่ 105 ถึง 115% และได้พบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ทราย มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ทรายที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับมอร์ต้าร์ควบคุม ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ทราย 5% มีค่าสูงที่สุด 262 และ 320 ksc ซึ่งมีค่าลดลง 40.4 และ 72.6% และเมื่อใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ทราย 25% มีค่าน้อยที่สุด 153 และ 210 ksc ซึ่งมีค่าลดลง 40.4 และ 72.6% ของมอร์ต้าร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



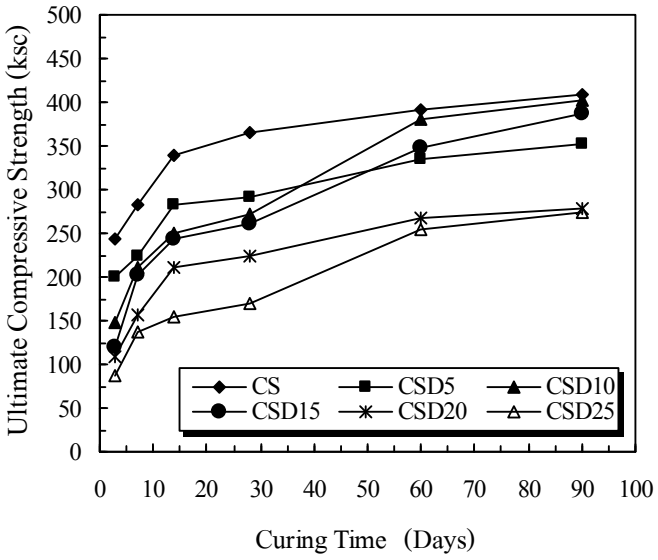
รูปที่ 2.12 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ไดอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ทราย (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)

ส่วนค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ไดอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับมอร์ต้าร์ควบคุม ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 5% มีค่าสูงที่สุด 337 และ 394 ksc มีค่าลดลง 7.9 และ 3.4% ซึ่งมีค่าลดลงที่น้อยกว่าการแทนที่ทราย และเมื่อใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 25% มีค่ากำลังอัดน้อยที่สุด 135 และ 221 ksc มีค่าลดลง 63.0 และ 45.9% ของมอร์ต้าร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ไดอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)

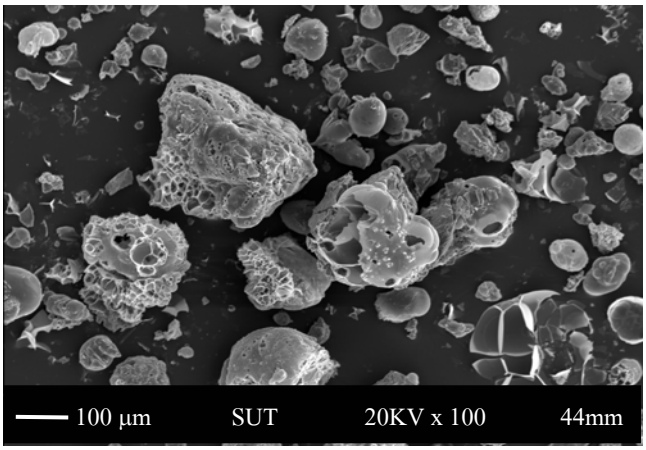
และเมื่อทำการผสมเพิ่มโดยไม่มีการลดปริมาณทรายและปูนซีเมนต์ ได้พบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ไดอะตอมไมท์โดยการผสมเพิ่มมีค่ากำลังอัดดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการแทนที่ทรายและแทนที่ปูนซีเมนต์ ค่ากำลังอัดมีค่าลดลงตามปริมาณการผสมเพิ่มที่เพิ่มขึ้น แต่กำลังอัดลดลงน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการแทนที่ทรายและแทนที่ปูนซีเมนต์ ส่วนการพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับมอร์ต้าร์ควบคุม ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ไดอะตอมไมท์ผสมเพิ่ม 10% รับกำลังอัดได้ดีที่สุด 273 และ 401 ksc มีค่าลดลง 25.4 และ 1.7% และเมื่อใช้ไดอะตอมไมท์ผสมเพิ่ม 15% มีค่ากำลังอัด 261 และ 386 ksc มีค่าลดลง 28.7 และ 5.4% ของมอร์ต้าร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ไดอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติโดยการผสมเพิ่ม (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)

2.5.2 เพอร์ไลท์ (perlite)

เพอร์ไลท์ เป็นหินภูเขาไฟเนื้อแก้วและรวมทั้งสิ่งที่เกิดจากการขยายตัวของหินภูเขาไฟเนื้อแก้วเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสม ในเวลาที่รวดเร็วจะขยายตัวออกไปได้ตั้งแต่ 4 ถึง 20 เท่าของปริมาตรเดิม ทำให้เปลี่ยนสภาพเป็นสารที่มีน้ำหนักเบา มีความพรุนสูงและมีลักษณะคล้ายหินพูมิซ สารที่ได้จากการขยายตัวของหินเพอร์ไลท์นี้ เรียกว่า เพอร์ไลท์ (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546) แสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ภาพขยายของเพอร์ไลท์ (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)

1) ลักษณะการเกิดของหินเพอร์ไลท์

เพอร์ไลท์จัดอยู่ในประเภทหินอัคนีพุ (effusive rock) มีเนื้อละเอียดเป็นแก้ว เนื่องจากเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของหินหนืด เป็นแร่องค์ประกอบร่วมกับหินไรโอไลต์ที่เกิดในระดับตื้นและมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว บริเวณที่พบในประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดกาญจนบุรีและพบมากที่จังหวัดลพบุรี โดยเฉพาะอำเภอสระโบสถ์มีปริมาณแร่เพอร์ไลต์ประมาณ 1 ล้านเมตริกตัน ประโยชน์ใช้เป็นส่วนผสมวัสดุก่อสร้างน้ำหนักเบาและเป็นส่วนเติมเต็มในอุตสาหกรรมปุ๋ยและอุตสาหกรรมสี (ณรงค์ศักดิ์ นันทคำภิรา และคณะ, ออนไลน์, 2547)

2) คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของหินเพอร์ไลท์

หินเพอร์ไลท์ส่วนใหญ่เนื้อหินมีลักษณะเป็นแก้ว มักจะมีรอยแตกเป็นวง ๆ ซ้อนกันคล้ายกลีบหัวหอม รอยแตกนี้อาจจะมองเห็นด้วยตาเปล่าหรืออาจจะต้องอาศัยดูด้วยแว่นขยายหรือใช้กล้องจุลทรรศน์ โดยทั่วไปจะมีสีเทาอ่อนแต่อาจจะพบสีดำ สีน้ำตาล หรือสีเขียวได้ และในเนื้อหินมักจะมีผลึกแร่ควอตซ์ แร่เฟลด์สปาร์ แร่ไบโอไทต์ แร่ฮอร์นเบลนด์ และมีชิ้นส่วนของเศษหินชนิดอื่นฝังตัวอยู่ ความแข็งตามมาตรฐานของโมห์ (Moh's scale) อยู่ระหว่าง 5.5 ถึง 7.0 มีความถ่วงจำเพาะ 2.3 ถึง 2.8 จุดหลอมตัว 760 ถึง 1300°C และค่าดัชนีหักเหแสง 1.49 ถึง 1.61

3) คุณสมบัติทางเคมีของหินเพอร์ไลท์

หินเพอร์ไลท์เป็นหินภูเขาไฟเนื้อแก้ว ที่มีส่วนประกอบของออกไซด์ของธาตุซิลิกาค่อนข้างสูงประมาณ 70% หรือมากกว่า มีน้ำเป็นส่วนประกอบประมาณ 2 ถึง 5% ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารเคมีอื่น ๆ ได้ง่ายนัก จัดอยู่ในจำพวกสารเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี เนื้อแก้วของหินเพอร์ไลท์จะมีการเปลี่ยนสภาพแก้วเป็นผลึก (diversification) เมื่ออายุของหินเพอร์ไลท์มากขึ้น ดังนั้นหินเพอร์ไลท์ที่จะมีคุณภาพดีและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้นั้น เนื้อแก้วจะต้องไม่เปลี่ยนสภาพแก้วเป็นผลึก

4) การใช้ประโยชน์

การนำเพอร์ไลท์ไปใช้ให้เป็นประโยชน์ได้หลายอย่าง ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีของเพอร์ไลท์ ส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในงานด้านก่อสร้างเพื่อประโยชน์ในการลดน้ำหนักของสิ่งก่อสร้าง ช่วยเป็นฉนวนป้องกันความร้อนและความเย็น สามารถเป็นผนังป้องกันเสียงได้ นอกจากนี้ได้มีการนำไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ ตลอดจนงานทางด้านเกษตรและงานด้านอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้แก่

- ด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้าง

มีการนำเพอร์ไลท์มาใช้ในด้านอุตสาหกรรมก่อสร้างประมาณ 70% ของปริมาณที่ผลิตได้ทั้งโลก เนื่องจากมีคุณสมบัติ คือ มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ มีความพรุนสูง และทนไฟ ด้วยคุณสมบัติเด่นดังกล่าว เพอร์ไลท์จึงนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น ฝ้าเพดาน

เนื่องจากเพอร์ไลท์เป็นส่วนประกอบของฝ้าเพดาน และผลิตภัณฑ์ยิปซัมแผ่นเรียบบางชนิด เพอร์ไลท์เป็นส่วนผสมที่ทำให้กระเบื้องไม่เป็นตัวนำความร้อน คลื่นเสียงผ่านทะลุไม่ได้ มีความหนาแน่นต่ำ และเป็นวัสดุทนไฟ เมื่อนำไปผสมกับปูนซีเมนต์ จะทำให้ได้คุณภาพที่ดีกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา เมื่อนำไปฉาบผนังตึกหรือเพดานจะทำให้ปูนสามารถยึดติดผนังได้ดี แห้งเร็ว และไม่เกิดรอยร้าว เนื่องจากมีความยืดหยุ่นได้ดี

นอกจากนี้เมื่อนำเพอร์ไลท์ไปผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการทำคอนกรีตใช้ในงานก่อสร้างต่าง ๆ ทำให้ลดน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างนั้นลงได้ และยังทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนและป้องกันการสะท้อนของเสียงได้เป็นอย่างดี คอนกรีตที่ใช้เพอร์ไลท์ผสมจะมีความหนาแน่นต่ำถึง 320 kg/m^3 และถ้ามีความหนาประมาณ 2 in. จะมีประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนได้เท่ากับแผ่นฉนวนมาตรฐาน แต่มีความแข็งแรงและคงทนกว่าแผ่นฉนวนมาตรฐานมาก ซึ่งได้มีการทดลองและเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยเพอร์ไลท์กับปูนซีเมนต์ผสมแบบธรรมดาโดยบริษัทผลิตเพอร์ไลท์ของประเทศญี่ปุ่น แสดงในตารางที่ 2.13 (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)

ตารางที่ 2.13 เปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเพอร์ไลท์กับปูนซีเมนต์ผสมทราย (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)

	Air Dry Unit Volume Weight (kg/l)	Thermal Conductivity (Kcal/mh °C)
คอนกรีตผสมเพอร์ไลท์	1.2 - 1.6	0.3 - 0.4
ปูนซีเมนต์ผสมทราย	2.0	1.2

จิตรกร ตังอนุสรณ์สุข และคณะ (2548) ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเพอร์ไลท์ที่มีอยู่ในประเทศไทย โดยใช้วิธี X-Ray Fluorescence ในการวิเคราะห์ แล้วนำองค์ประกอบดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยใช้วิธีดังกล่าวในการวิจัยเช่นกัน แสดงในตารางที่ 2.14 เพื่อจะทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของเพอร์ไลท์และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้เป็นข้อมูลคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุทั้ง 2 ชนิด ให้สามารถใช้เป็นวัตถุดิบที่สามารถนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้างได้ เช่น นำมาใช้ในการทำคอนกรีตมวลเบาที่ทำเป็นคอนกรีตฉนวน เป็นต้น

ตารางที่ 2.14 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์กับเพอร์ไลท์ (จิตรกร ตังอนุสรณ์สุข, 2548)

ออกไซด์	สัญลักษณ์	ปริมาณโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ (%)	ปริมาณโดยน้ำหนักของเพอร์ไลท์ในประเทศไทย (%)
CaO	C	60 - 67	0.6
SiO_2	S	17 - 25	71.0
Al_2O_3	A	3 - 8	16.1
Fe_2O_3	F	0.5 - 6.0	0.7
MgO	M	0.1 - 4.0	0.4
Na_2O	N	0.1 - 1.8	0.9
K_2O	K	0.1 - 1.8	5.6
SO_3	S	0.5 - 3.0	-
FeO	Fe	-	0.7
H_2O (comb)	-	-	3.6
สารประกอบอื่นๆ	-	0.5 - 3.0	-
(loss on ignition)	LOI	0.1 - 3.0	-
(insoluble residue)	-	0.20 - 0.75	-

- ความเป็นฉนวน

ห้องที่ต้องการรักษาอุณหภูมิทั้งความเย็นหรือความร้อนเป็นพิเศษ ได้มีการใช้เพอร์ไลท์ อัดเข้าไปในช่องว่างระหว่างผนังของห้องซึ่งมักจะใช้เพอร์ไลท์ที่มีความหนาแน่นที่น้อยกว่า 64 kg/m^3 เช่น ห้องเก็บเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่ต้องการอุณหภูมิภายในห้องต่ำ

- ความดูดซึม

เนื่องจากเพอร์ไลท์มีปริมาณออกไซด์ของธาตุซิลิกาสูง อาจมีมากกว่า 70% มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซึมที่ดีและยังเป็นสารเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมีในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงสามารถนำเพอร์ไลท์ไปใช้เป็นตัวกรองและตัวดูดซึมที่ดี

- คุณสมบัติอื่น ๆ

นอกจากที่กล่าวมาแล้ว เพอร์ไลท์ยังสามารถนำไปใช้ผสมกับสีทาได้ทั้งภายในและภายนอกของอาคารบ้านเรือนและมีการนำเพอร์ไลท์ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ใช้เป็นผงขัดและผสมซีเมนต์ใช้ในการฉาบผนังบ่อน้ำมัน

5) การผลิตเพอร์ไลท์ในประเทศไทย

ในปัจจุบันเพอร์ไลท์มีการผลิตจากประทานบัตรของ หจก.คลองยาง จำนวน 1 แปลง เพียงแหล่งเดียว ตั้งอยู่ที่ตำบลมหาโพธิ์ อำเภอสระโบสถ์ จังหวัดลพบุรี มีอัตราการผลิตประมาณ 2400 ตันต่อปี สำหรับแร่เกรดสูงเพื่อเผาสำหรับทำวัสดุกรองคุณภาพสูงและถูกจำหน่ายให้กับโรงงานน้ำผลไม้ การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (hydroponic) ตัวเติมสำหรับปูนฉาบสำเร็จ และอิฐทนไฟ โดยจำหน่ายให้กับโรงเผาที่จังหวัดราชบุรี ราคาของเพอร์ไลท์คุณภาพสูงก่อนการเผาที่ 650 บาทต่อตัน เมื่อเผาแล้วราคาจะเพิ่มขึ้นเป็น 6000 ถึง 12000 บาทต่อตัน ขึ้นกับคุณสมบัติความขาว และความหนาแน่น (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)

ประพัตร์ กรังพานิชย์ (2540) ได้ศึกษาถึงการนำกากแร่สังกะสีและเพอร์ไลท์มาผลิตเป็นคอนกรีตมวลเบา โดยนำกากแร่สังกะสีและเพอร์ไลท์เป็นวัสดุผสมแทนทรายเพื่อลดน้ำหนักของคอนกรีตและได้การศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติของเพอร์ไลท์ในด้านต่าง ๆ เช่น ศึกษาองค์ประกอบหลักทางเคมีของเพอร์ไลท์ โดยใช้วิธี X – Ray Fluorescence ซึ่งพบว่ามีองค์ประกอบหลักของเพอร์ไลท์ ได้แก่ SiO_2, Al_2O_3 และ K_2O ซึ่งพบในปริมาณ 70.3, 13.6 และ 5.7% ตามลำดับ ส่วนองค์ประกอบรอง (trace element) พบในปริมาณไม่มากนัก ได้แก่ P_2O_2, MgO, CaO และได้ศึกษาถึงความหนาแน่นรวม (bulk density) โดยการนำเพอร์ไลท์มาบดแล้วคัดขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐาน เพื่อหาขนาดของเพอร์ไลท์ที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นมวลรวมผสมคอนกรีต ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ขนาด 0.9 mm มีความเหมาะสมในการใช้งานและค่าความหนาแน่นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่มีการใช้โดยทั่วไป คือ 40 ถึง 300 kg/m^3

คม บัวคลี่ และรังสรรค์ รังสิมาวงศ์ (2540) ได้ศึกษาเพื่อหาสัดส่วนการผสมมอร์ต้าร์มวลเบาโดยการใช้เพอร์ไลท์มาแทนที่ทรายบางส่วน เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการและสามารถนำมอร์ต้าร์มวลเบานี้ไปใช้งานได้จริงในการผลิตผนังมวลเบา โดยในการทดลองได้ใช้ทั้งขนาดหยาบและขนาดละเอียดปนกัน เพอร์ไลท์ในการทดสอบมีหน่วยน้ำหนักประมาณ 252 kg/m^3 การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์นั้น แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ การทดสอบหน่วยน้ำหนัก การทดสอบความสามารถเทได้โดยใช้โต๊ะการไหล และการทดสอบกำลังอัด โดยกำหนดเป้าหมายดังนี้ ด้านหน่วยน้ำหนักไม่เกิน 800 kg/m^3 ค่าการไหลแผ่ควรมากกว่า 70% และกำลังอัดไม่ต่ำกว่า 35 ksc ที่อายุ 7 วัน ผลการศึกษาพบว่าหน่วยน้ำหนักจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเพอร์ไลท์ที่ใช้แทนที่ทรายและปริมาณช่องว่างอากาศที่แทรกในเนื้อมอร์ต้าร์ โดยปริมาณเพอร์ไลท์ที่เหมาะสมที่สุด คือ

แทนที่ทราย 90% โดยปริมาตร ด้านการไหลขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในเพอร์ไลท์เป็นหลัก กล่าวคือ การไหลจะดีเมื่อปริมาณความชื้นในเพอร์ไลท์อยู่ระหว่าง 90 ถึง 100% ส่วนด้านกำลังอัด พบว่ามอร์ต้าร์ที่ใส่ทั้งสารกระจายกักฟองอากาศและสารลดน้ำอย่างมากมีคุณสมบัติตรงตามเป้าหมาย คือ ค่ากำลังอัด 37 ksc ที่อายุ 7 วัน คุณสมบัติด้านหน่วยน้ำหนักและความสามารถเทได้นั้นขึ้นกับปัจจัยหลายประการ แต่ที่ควรระมัดระวังเป็นพิเศษ คือ ปริมาณความชื้นในเพอร์ไลท์และขนาดของเพอร์ไลท์ที่ใช้ในการผสม

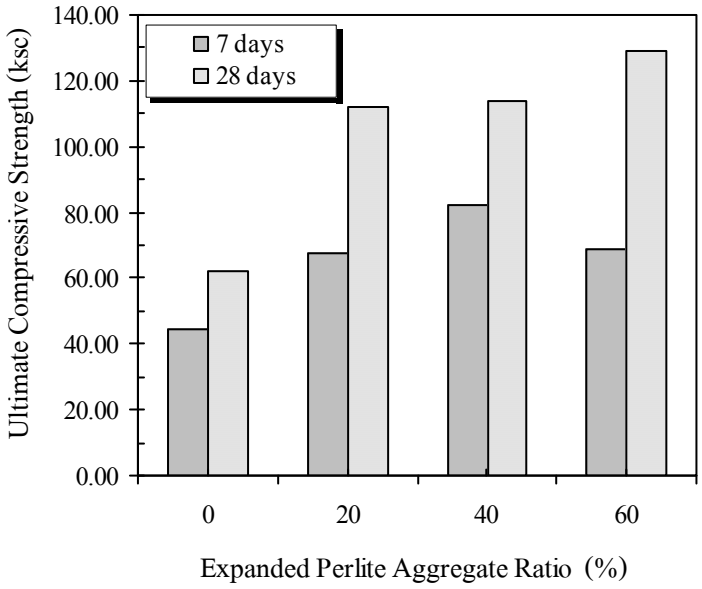
Demirboga, Orung, and Gul (2001) ได้ศึกษาผลกระทบของเพอร์ไลท์และสารแร่ธาตุผสมเพิ่มที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา โดยใช้เพอร์ไลท์แทนที่หินพูมิซ 20, 40 และ 60% ใช้ซิลิกาฟูมและเถ้าถ่านหิน Class C แทนที่ปูนซีเมนต์ 10, 20 และ 30% ใช้สารลดน้ำจำนวนมาก 1.5% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ควบคุมปริมาณวัสดุประสานที่ 200 kg/m^3 หล่อตัวอย่างโดยใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาด 100×200 mm ควบคุมค่ายุบตัวที่ 20±5 mm ทำการบ่มในแบบหล่อ 1 วัน และบ่มในน้ำอีก 6 และ 27 วัน แล้วทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 192

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของเพอร์ไลท์จากประเทศตุรกี พบว่ามีปริมาณสารประกอบหลัก SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 เมื่อรวมกันแล้วมีค่ามากกว่า 70% โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติในการเป็นวัสดุปอซโซลาน แสดงในตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.15 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน และเพอร์ไลท์ (Demirboga, Orung and Gul, 2001)

ออกไซด์	ปูนซีเมนต์ (%)	ซิลิกาฟูม (%)	เถ้าถ่านหิน (%)	เพอร์ไลท์ (%)
SiO_2	19.8	85.0-95.0	30.6	71.0-75.0
Al_2O_3	5.6	1.0-3.0	14.8	-
Fe_2O_3	3.4	0.5-1.0	5.5	12.0-16.0
CaO	63.0	0.8-1.2	36.8	0.2-0.5
MgO	1.8	1.0-2.0	2.5	-
SO_3	2.4	-	4.9	-
C	-	0.5-1.0	-	-
K_2O	-	-	-	-
Na_2O	-	-	-	2.9-4.0
TiO_2	-	-	-	-
LOI	0.4	0.5-1.0	2.4	-

และพบว่าเมื่อเพิ่มเพอร์ไลท์ในปริมาณที่มากขึ้นสามารถลดหน่วยน้ำหนักลดได้โดย ตัวอย่างที่ใช้เพอร์ไลท์แทนที่หินพูมิซ 60% และใช้ซิลิกาฟูมในส่วนผสม 30% สามารถลดหน่วยน้ำหนักได้มากถึง 37% ของคอนกรีตควบคุม และเมื่อพิจารณาค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ไม่มีซิลิกาฟูมหรือเถ้าถ่านหินในส่วนผสม พบว่าเมื่อใช้เพอร์ไลท์แทนที่หินพูมิซ 20, 40 และ 60% มีค่าเพิ่มขึ้น 52, 85 และ 55 % ที่อายุการบ่ม 7 วัน และมีค่าเพิ่มขึ้น 80, 84 และ 108% ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้เพอร์ไลท์แทนที่หินพูมิซในปริมาณเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบานี้เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากหินพูมิซมีลักษณะค่อนข้างเปราะและโพรงอากาศภายในเนื้อของหินพูมิซมีการกระจายตัวไม่ดีเท่าที่ควรเมื่อเทียบกับเพอร์ไลท์ที่มีขนาดเล็กจึงทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีกว่า แต่วัสดุทั้งสองมีคุณสมบัติเบาเหมือนกัน แสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์อัตราส่วนเพอร์ไลท์กับกำลังอัดของคอนกรีต

(Demirboga, Orung, and Gul, 2001)

การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่มีใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ 10% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่หินพูมิซ 40% ให้ค่ากำลังอัดดีที่สุด คือ มีเพิ่มขึ้น 5% คอนกรีตที่เพอร์ไลท์แทนที่หินพูมิซ 40% ที่อายุการบ่ม 28 วัน และเมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่มีใช้เถ้าถ่านหินในส่วนผสมทุกการแทนที่ทำให้ค่ากำลังอัดลด

ปริมาณการแทนที่เพอร์ไลท์ที่มากเกินไปทำให้ปริมาณน้ำในการทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอ เพราะเพอร์ไลท์มีค่าการดูดซึมน้ำที่สูง อีกทั้งในการเพิ่มปริมาณซิลิกาฟูมที่มากเกินไปทำให้ความต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วยเพราะซิลิกาฟูมมีความละเอียดมากจึงมีพื้นที่ผิวที่ต้องการน้ำมากเช่นกัน

Demirboga and Gul (2003) ได้ศึกษาผลกระทบของสารผสมเพิ่มต่อคุณสมบัติด้านการนำความร้อนของคอนกรีตที่ใช้เพอร์ไลท์ในส่วนผสม ซึ่งการนำความร้อนของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำมีการนำความร้อน (thermal conductivity) ถึง 5 เท่าของอากาศและเมื่อมีความชื้นหรือน้ำเข้าไปแทนที่ช่องว่างอากาศในคอนกรีตจะส่งผลให้การนำความร้อนเพิ่มมากขึ้น Demirboga (2003) ได้นำเสนองานวิจัยของ Steiger และ Hurd (1978) ที่ได้รายงานว่า ถ้าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเนื่องจากการดูดซึมน้ำ 1% จะส่งผลให้การนำความร้อนเพิ่มขึ้น 5%

การนำความร้อนนอกจากจะขึ้นอยู่กับช่องว่างและปริมาณความชื้นแล้วยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการนำความร้อนของมวลรวมอีกด้วย จึงได้ทำการศึกษาโดยใช้เพอร์ไลท์ในปริมาณที่เท่ากันทุกส่วนผสมและแปรผันปริมาณซิลิกาฟูมและเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณ 10, 20 และ 30% ใช้สารลดน้ำจำนวนมาก 1.5% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ควบคุมปริมาณวัสดุประสานที่ 200 kg/m^3 ทดสอบโดยใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาด 100×200 mm โดยควบคุมค่ายุบตัวที่ 20±5 mm ทำการบ่มในแบบหล่อ 1 วัน และบ่มในน้ำอีก 6 และ 27 วัน แล้วทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 192

จากการทดสอบการนำความร้อน แสดงในตารางที่ 2.16 โดยใช้เครื่องทดสอบ QTM 500 device ที่มีช่วงการวัดอยู่ที่ 0.0116 ถึง 6 W/mK ±5% สามารถควบคุมความร้อนให้อยู่ในช่วงระหว่าง 100 ถึง 1000°C ทดสอบกับก้อนตัวอย่างที่มีขนาด 100W×80L×40T mm ใช้เวลาในการให้ความร้อน 100 ถึง 120 วินาที

ตารางที่ 2.16 การนำความร้อนและความหนาแน่นของคอนกรีตผสมเพอร์ไลท์

(Demirboga and Gul, 2003)

	ปริมาณ	ซิลิกาฟูม (%)			เถ้าถ่านหิน (%)		
	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

จากการทดสอบพบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเพอร์ไลท์และซิลิกาฟูม (silica fume) หรือเถ้าถ่านหิน (fly ash) ในส่วนผสม จะทำให้ค่าการนำความร้อนลดลง เนื่องจากความหนาแน่นของตัวอย่างที่ลดลง โดยเมื่อใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ 10, 20 และ 30% ค่าการนำความร้อนลดลง 4, 14 และ 13% ในทำนองเดียวกันเมื่อใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ 10, 20 และ 30% ค่าการนำความร้อนลดลง 7, 9 และ 18% ของตัวอย่างควบคุมตามลำดับ ในการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน 10 และ 30% ทำให้ค่าการนำความร้อนลดลงได้มากกว่าการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูม กล่าวคือ เมื่อความหนาแน่นของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นด้วย

และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบกำลังอัด ดังแสดงในตารางที่ 2.17 พบว่าคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ 10, 20 และ 30% ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง 12, 19 และ 29% ที่อายุการบ่ม 7 วัน และค่ากำลังอัดเพิ่มสูงขึ้น 9, 13 และ 4% ของคอนกรีตควบคุมที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของซิลิกาฟูม ที่สามารถทำให้ช่องว่างเล็ก ๆ ของคอนกรีตลดลง (filler effect) เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ 10, 20 และ 30% พบว่าเมื่อใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ 10% ค่ากำลังอัดลดลงที่อายุการบ่ม 7 วัน แต่ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่วนที่การแทนที่ 20 และ 30% พบว่าทั้งอายุการบ่ม 7 และ 28 วัน ค่ากำลังอัดมีค่าลดลง เนื่องจากเถ้าถ่านหินต้องการระยะเวลาในการบ่มเพื่อทำปฏิกิริยาที่นานกว่า (long curing period) ของซิลิกาฟูม

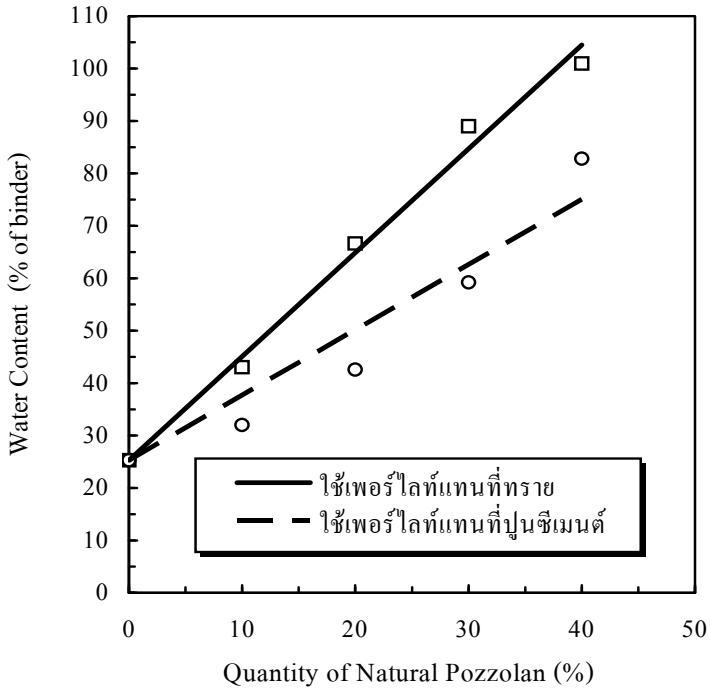
ตารางที่ 2.17 กำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วันของคอนกรีตผสมเพอร์ไลท์ (Demirboga and Gul, 2003)

	ปริมาณ	ซิลิกาฟูม (%)			เถ้าถ่านหิน (%)		
	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 คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเพอร์ไลท์สามารถทำให้การนำความร้อนลดลง การนำความร้อนนอกจากจะขึ้นอยู่กับปริมาณช่องว่าง ปริมาณความชื้น ความสามารถในการนำความร้อนของมวลรวมและความหนาแน่นของคอนกรีตที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นด้วย

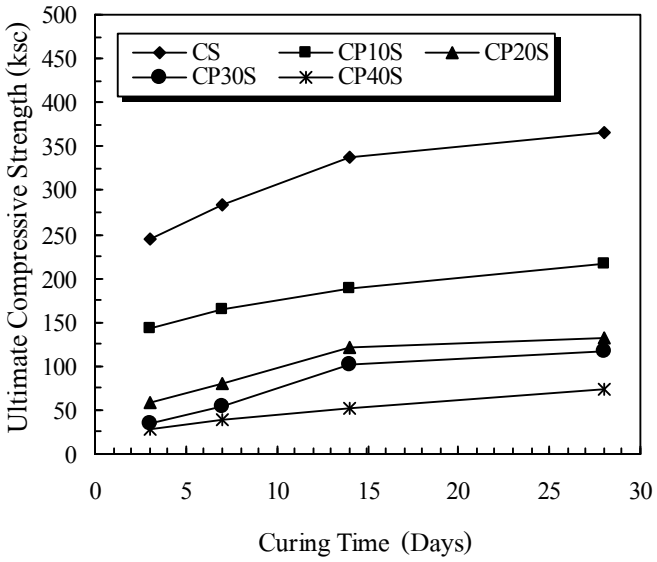
Topcu and Isikdag (2007) ได้ตระหนักถึงประโยชน์ของเพอร์ไลท์ว่าเป็นได้ทั้งฉนวนกันความร้อนและเสียง และยังเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่าจะสามารถทำให้ประหยัดค่าก่อสร้างได้และ Topcu ได้กล่าวการศึกษาของ Gunning (1994) ที่ได้รายงานว่าเพอร์ไลท์สามารถเผาให้ขยายตัวได้ 15 ถึง 20 เท่า เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1100°C ในการแทนที่เพอร์ไลท์ในคอนกรีต สามารถทำได้โดยการแทนที่ส่วนผสมละเอียดและการแปรผันปริมาณการแทนที่จะขึ้นอยู่กับความต้องการกำลังอัดและเมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีในการผลิตปูนซีเมนต์ พบว่าเพอร์ไลท์สามารถเผาและบดให้ละเอียดได้ง่ายกว่าปูนซีเมนต์ โดยเพอร์ไลท์สามารถถูกเผาเพื่อให้เกิดการขยายตัวได้ที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1100°C ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เผาที่อุณหภูมิ 1400 ถึง 1500°C ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่าเพอร์ไลท์ใช้พลังงานในการผลิตที่น้อยกว่า ถึงแม้ว่าในการเพิ่มเพอร์ไลท์ในส่วนผสมของคอนกรีตจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงในช่วงอายุต้น แต่กำลังของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเพอร์ไลท์สามารถพัฒนากำลังอัดให้เพิ่มสูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น คล้ายคลึงกับวัสดุปอซโซลานทั่วไป และยังมีข้อได้เปรียบ คือ มีหน่วยน้ำหนักที่เบากว่า อีกทั้งยังมีความต้านทานต่อการแช่แข็งและละลายตัว (freezing-thawing) ของโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาพอากาศหนาวหรือในห้องเย็นได้ดีอีกด้วย

ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (2550) นอกจากได้ทำการศึกษาการใช้ไดอะตอมไมท์ในงานคอนกรีตมวลเบาแล้ว ยังมีการศึกษาเปรียบเทียบการใช้เพอร์ไลท์ในงานคอนกรีตมวลเบาด้วย และได้ทำการศึกษาในลักษณะเดียวกันกับการใช้ไดอะตอมไมท์ในงานคอนกรีตมวลเบา คือ ใช้เพอร์ไลท์ชนิดหยาบที่มี ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 77.7 μm ค่าความถ่วงจำเพาะ 0.5 และมีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ระหว่าง 160 ถึง 205 kg/m^3 แทนที่ทรายและปูนซีเมนต์ 0, 10, 20, 30 และ 40% และได้พบว่าปริมาณการเพิ่มขึ้นของเพอร์ไลท์ชนิดหยาบส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเพิ่มปริมาณน้ำ เนื่องจากในการวิจัยนี้มีการควบคุมปริมาณน้ำที่สามารถทำให้คอนกรีตมวลเบามีค่าการไหลแผ่ 105 ถึง 115% ส่วนผสมโดยการแทนที่ทรายทำให้มีความต้องการปริมาณน้ำมากกว่าการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ เนื่องจากปริมาณทรายในส่วนผสมมีถึง 2.75 เท่าของปริมาณซีเมนต์ คอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดหยาบแทนที่ทรายและปูนซีเมนต์มีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 20.0 และ 12.5% ทุกปริมาณการแทนที่ 10% ของคอนกรีตมวลเบาควบคุม ตามลำดับ การใช้เพอร์ไลท์ชนิดหยาบในคอนกรีตมวลเบามีการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมากกว่าการใช้ไดอะตอมไมท์ เนื่องจากเพอร์ไลท์ชนิดหยาบมีความพรุนสูงกว่า และมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.17



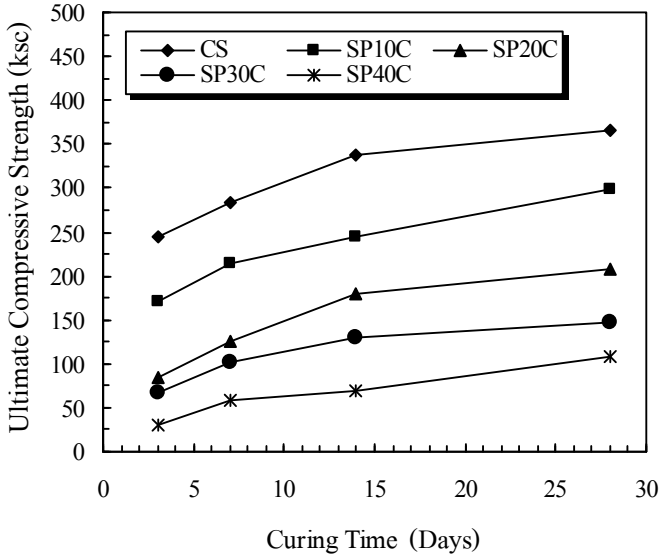
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ปริมาณน้ำกับปริมาณเพอร์ไลท์ชนิดหยาบ
(ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)

กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดหยาบแทนที่ทรายมีลักษณะคล้ายคลึงกับการแทนที่ทรายด้วยไดอะตอมไมท์ โดยมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ทรายที่เพิ่มขึ้น แต่มีค่ากำลังอัดน้อยกว่าการแทนที่ทรายด้วยไดอะตอมไมท์ แต่อย่างไรก็ตามการพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นคล้ายกับคอนกรีตควบคุมตามอายุการบ่ม ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดหยาบแทนที่ทรายมีค่าสูงที่สุด 216 ksc และมีค่าน้อยที่สุด 73 ksc เมื่อใช้เพอร์ไลท์ชนิดหยาบแทนที่ทราย 10 และ 40% ซึ่งมีค่าลดลง 41.0 และ 80.0% ของคอนกรีตมวลเบาควบคุมที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



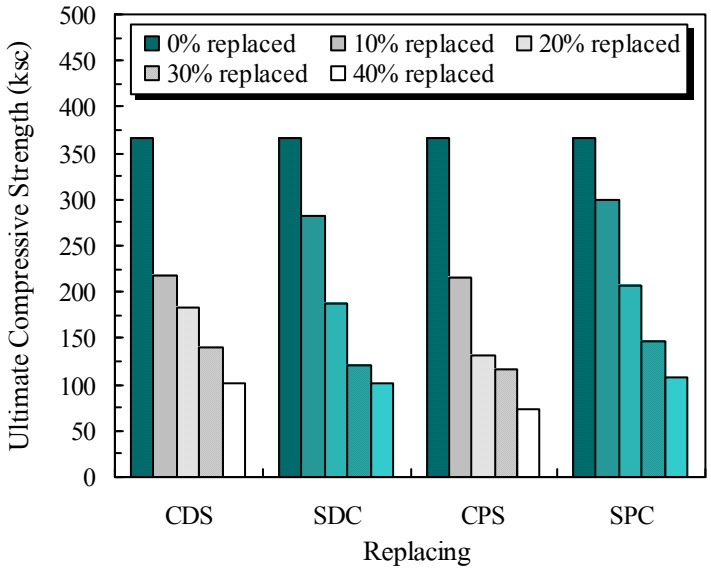
รูปที่ 2.18 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดหยาบแทนที่ทราย (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)

ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดหยาบแทนที่ปูนซีเมนต์มีลักษณะคล้ายคลึงกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์ โดยมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น แต่มีค่ากำลังอัดที่มากกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์ อย่างไรก็ตามการพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นคล้ายกับคอนกรีตควบคุมตามอายุการบ่ม ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดหยาบแทนที่ปูนซีเมนต์มีค่าสูงที่สุด 299 ksc และมีค่าน้อยที่สุด 108 ksc เมื่อใช้เพอร์ไลท์ชนิดหยาบแทนที่ปูนซีเมนต์ 10 และ 40% ซึ่งมีค่าลดลง 18.3 และ 70.5% ของคอนกรีตมวลเบาควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดหยาบแทนที่ปูนซีเมนต์ (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)

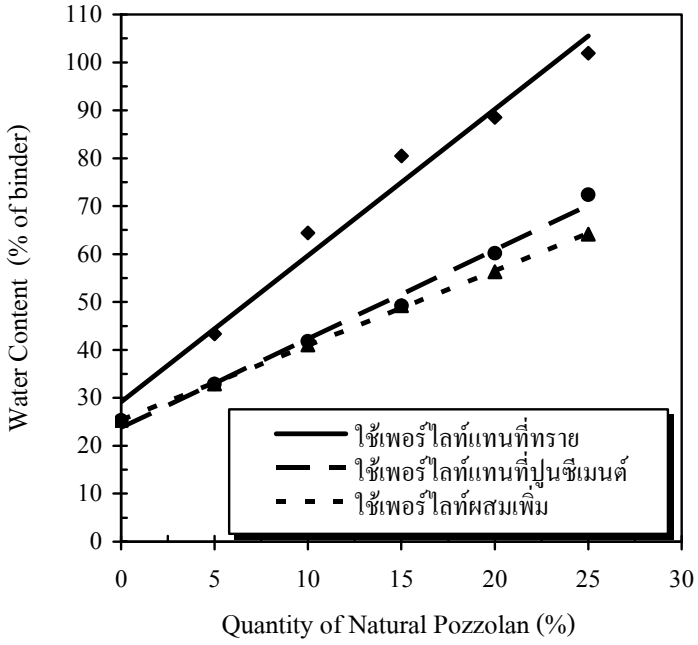
เมื่อพิจารณากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดหยาบเปรียบเทียบกับไดอะตอมไมท์ พบว่าการแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ชนิดหยาบให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าไดอะตอมไมท์ 1.0 และ 27.2% ที่การแทนที่ 10 และ 40% ตามลำดับ แต่การแทนที่ปูนซีเมนต์พบว่าการแทนที่ด้วยเพอร์ไลท์ชนิดหยาบให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าไดอะตอมไมท์ โดยในการแทนที่ด้วยเพอร์ไลท์ชนิดหยาบให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าไดอะตอมไมท์ 5.6 และ 27.2% ที่การแทนที่ 10 และ 40% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ชนิดหยาบที่อายุการบ่ม 28 วัน (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)

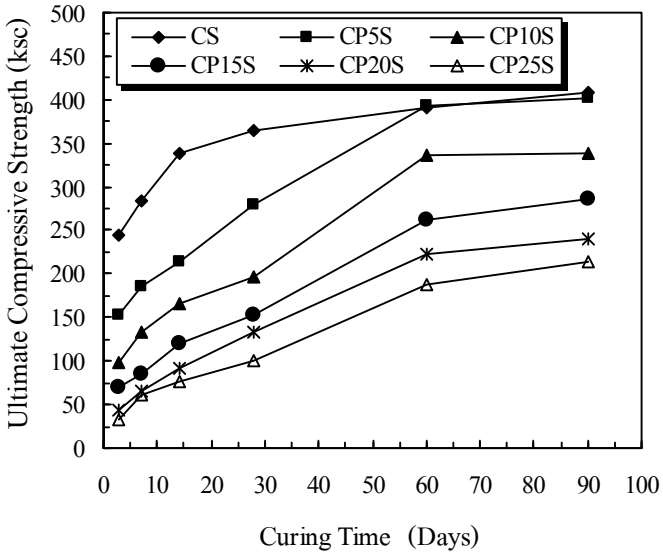
ในการพิจารณาค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ชนิดหยาบในส่วนผสม ยังมีปัจจัยอื่นที่ควรคำนึงถึงด้วย เช่น ค่าหน่วยน้ำหนัก ที่ต้องคำนึงถึงเพื่อต้องการคอนกรีตมวลเบาที่มีค่ากำลังอัดสูงและมีหน่วยน้ำหนักต่ำ เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งาน

และเมื่อ ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (2550) ได้ลองทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเพอร์ไลท์มาใช้เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มในงานคอนกรีต โดยนำเพอร์ไลท์แทนที่ทราย แทนที่ปูนซีเมนต์ และผสมเพิ่ม ที่ปริมาณ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และควบคุมอัตราการไหลแผ่ที่ 105 ถึง 115% แต่เพอร์ไลท์ที่ใช้เป็นชนิดที่มีความละเอียดสูงขึ้นเพื่อให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น โดยเพอร์ไลท์ที่ใช้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 28.8 μm ค่าความถ่วงจำเพาะ 0.9 และมีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ระหว่าง 120 ถึง 150 kg/m^3 จากการศึกษาพบว่าการใช้เพอร์ไลท์ชนิดละเอียด เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติส่งผลกระทบโดยตรงต่อความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมเช่นเดียวกับการใช้ในคอนกรีตมวลเบา เมื่อทำการแทนที่ทราย แทนที่ปูนซีเมนต์ และผสมเพิ่มด้วยเพอร์ไลท์ ทุก 5% จะส่งผลให้มีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 32.3, 17.9 และ 15.5% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณน้ำของมอร์ต้าร์ควบคุม ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.21



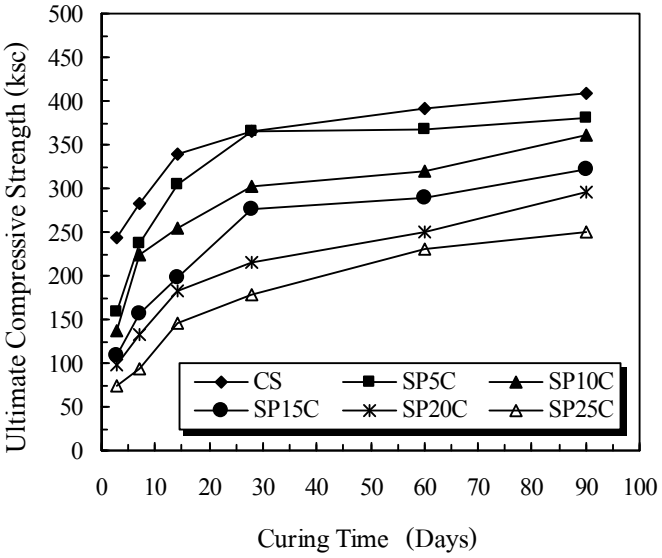
รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ปริมาณน้ำกับปริมาณเพอร์ไลท์ชนิดละเอียด
(ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)

ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (2550) ได้พบว่าการแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ชนิดละเอียดมีความต้องการปริมาณน้ำมากที่สุด และจากผลการทดสอบกำลังอัด พบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดละเอียดเป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มโดยการแทนที่ทราย มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ทรายที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับมอร์ต้าร์ควบคุม ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดละเอียดแทนที่ทราย 5% มีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ควบคุม โดยมีค่าสูงที่สุด 279 และ 401 ksc ซึ่งมีค่าลดลงเพียง 23.6 และ 1.7% ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ แต่ที่อายุ 60 วัน มีค่ากำลังอัดเพิ่มสูงกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม โดยมีค่ากำลังอัดประมาณ 393 ksc ซึ่งสูงกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม 0.4% ดังแสดงในรูปที่ 2.22



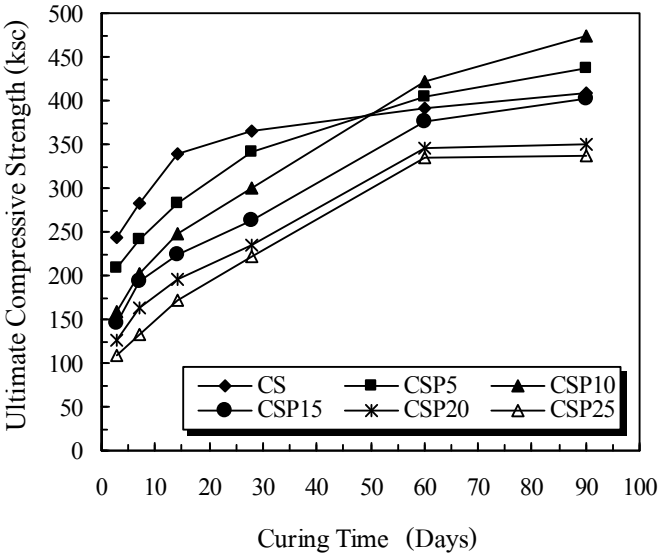
รูปที่ 2.22 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดละเอียดเป็นสารปอซโซลานธรรมชาติโดยการแทนที่ทราย (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)

ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับมอร์ต้าร์ควบคุม ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ 5% มีค่าลดลงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับการแทนที่ทราย ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่เท่ากัน โดยมีค่าสูงที่สุด 365 และ 381 ksc มีค่าลดลง 0.2 และ 6.6% และเมื่อใช้เพอร์ไลท์ชนิดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ 25% มีค่ากำลังอัดน้อยที่สุด 179 และ 250 ksc มีค่าลดลง 51.2 และ 38.9% ของมอร์ต้าร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดละเอียดเป็นสารปอซโซลานธรรมชาติโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)

และเมื่อใช้เพอร์ไลท์ชนิดละเอียดผสมเพิ่ม โดยไม่ลดปริมาณทรายหรือปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ส่งผลให้มีค่ากำลังอัดลดลงที่ปริมาณการผสมเพิ่ม 20 และ 25% แต่กำลังอัดที่เปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม 5, 10 และ 15% มีค่าลดลงน้อยมากหรือมีค่าเพิ่มมากกว่ามอร์ต้าร์ควบคุมในบางช่วงอายุการบ่ม โดยเปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม 5% มีค่ากำลังอัด 342, 405 และ 437 ksc มีค่าลดลง 6.4 และมีค่าเพิ่มขึ้น 3.5 และ 7.1% ส่วนการใช้เพอร์ไลท์ชนิดละเอียดผสมเพิ่ม 10% มีค่ากำลังอัด 300, 423 และ 473 ksc มีค่าลดลง 17.92 และมีค่าเพิ่มสูงขึ้น 8.0 และ 15.9% ของมอร์ต้าร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการใช้เพอร์ไลท์ชนิดละเอียดผสมเพิ่ม 15% ค่ากำลังอัดลดลงน้อยมากหรือใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ควบคุมเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น โดยมีค่ากำลังอัด 263, 377 และ 401 ksc มีค่าลดลง 28.0, 3.7 และ 1.7% ของมอร์ต้าร์ควบคุมที่อายุการบ่ม 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.24

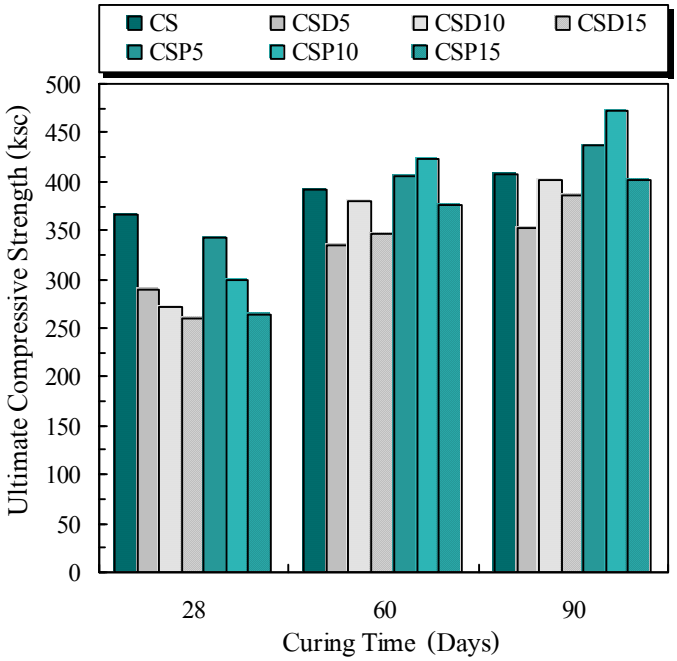


รูปที่ 2.24 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดละเอียดเป็นสารปอซโซลานธรรมชาติโดยการผสมเพิ่ม (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)

ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (2550) ได้พิจารณาเปรียบเทียบกำลังอัดของวัสดุปอซโซลานธรรมชาติทั้ง 2 ชนิด เพื่อใช้เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม ที่เปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม 5, 10 และ 15% ที่อายุการบ่ม 28, 60 และ 90 วัน ดังแสดงในรูปที่ 2.25 พบว่าการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุการบ่มมากขึ้นของมอร์ต้าร์ที่ผสมเพอร์ไลท์ชนิดละเอียด 5 และ 10% มีค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าร์ที่ผสมด้วยไดอะตอมไมท์และมอร์ต้าร์ควบคุม โดยที่การผสมเพิ่ม 5% มีค่ากำลังอัด 405 และ 437 ksc เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ที่ผสมเพิ่มด้วยไดอะตอมไมท์ที่เปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่มเดียวกันที่มีค่ากำลังอัด 334 และ 352 ksc พบว่ามีค่ามากกว่า 21.2 และ 24.4% และมีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม ที่มีค่ากำลังอัด 391 และ 408 ksc อยู่ 3.5 และ 7.1% ที่อายุการบ่ม 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ส่วนการใช้เพอร์ไลท์ชนิดละเอียดผสมเพิ่ม 10% มีค่ากำลังอัด 423 และ 473 ksc เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ที่ผสมเพิ่มด้วยไดอะตอมไมท์ที่เปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่มเดียวกันที่มีค่ากำลังอัด 380 และ 347 ksc พบว่ามีค่ามากกว่า 11.2 และ 36.3% และมีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม 8.0 และ 15.9% ที่อายุการบ่ม 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

ในการใช้เพอร์ไลท์ชนิดละเอียดเป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม มีประสิทธิภาพมากกว่าไดอะตอมไมท์ และได้รับค่ากำลังอัดที่สูงกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม แต่ควรใช้ในปริมาณที่เหมาะสม คือ ที่เปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม 5 ถึง 10% เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการพัฒนากำลังอัดมากที่สุด อย่างไรก็ตามการใช้ไดอะตอมไมท์ในส่วนผสมที่การผสมเพิ่ม 5 ถึง 10% สามารถทำได้และมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ควบคุม แต่การพัฒนา

กำลังช้ากว่า เพอร์ไลท์ชนิดละเอียดจึงต้องการอายุการบ่มมากขึ้น เพราะจากการสังเกตข้อมูลผลการทดสอบพบว่า มีแนวโน้มในการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ



รูปที่ 2.25 เปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ชนิดละเอียดผสมเพิ่มในส่วนผสม 5, 10 และ 15% ที่อายุการบ่ม 28, 60 และ 90 วัน (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)

ส่วนผลกระทบต่อหน่วยน้ำหนัก พบว่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดหยาบแทนที่ในส่วนผสม ทั้งการแทนที่ทรายและปูนซีเมนต์มีค่าต่ำกว่าการใช้ไดอะตอมไมท์ เนื่องจากเพอร์ไลท์ชนิดหยาบมีความพรุนมากกว่า และมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าไดอะตอมไมท์ ค่าหน่วยน้ำหนักที่มีค่าต่ำสุดที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ทราย 40% มีค่าหน่วยน้ำหนัก 1115 kg/m^3 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาที่แทนที่ทรายด้วยไดอะตอมไมท์ 38.7% ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่เท่ากัน และมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาควบคุม 49.4% ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลท์ชนิดหยาบมีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุดที่ปริมาณการแทนที่ 40% เช่นกัน โดยมีค่าหน่วยน้ำหนัก 1640 kg/m^3 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์ 14.4% ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่เท่ากัน และมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม 25.6% ดังแสดงในตารางที่ 2.18

ตารางที่ 2.18 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ชนิดหยาบ (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)

อายุการบ่ม (days)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)			
	3	7	14	28
CS	2180	2195	2000	2205
CD10S	2055	2075	2115	2125
CD20S	1965	1980	2000	2015
CD30S	1830	1860	1870	1890
CD40S	1745	1800	1810	1820
SD10C	2045	2050	2115	2135
SD20C	1960	1975	2040	2070
SD30C	1895	1900	1945	1995
SD40C	1810	1815	1875	1915
CP10S	1820	1825	1825	1830
CP20S	1505	1545	1565	1595
CP30S	1215	1270	1345	1395
CP40S	1035	1055	1100	1115
SP10C	1980	2035	2040	2050
SP20C	1800	1840	1880	1865
SP30C	1675	1710	1730	1755
SP40C	1530	1535	1570	1640

หมายเหตุ : หน่วยน้ำหนักที่ทดสอบเป็นหน่วยน้ำหนักแห้งในอากาศ (air dry unit weight)

2.6 สรุปปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการค้นคว้าวรรณกรรมและงานวิจัยของ Kedsarin Pimraksa and Prinya Chindaprasirt (2008), Fragoulisa et al. (2004), จิตรกร ตังอนุสรณ์สุข และคณะ (2548) และประพัตร์ กรังพานิชย์ (2540) พบว่าไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์มีคุณสมบัติแตกต่างกันและเมื่อผสมในคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติแตกต่างกันเนื่องจากไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์จากแต่ละแหล่งจะมีปริมาณออกไซด์หลักและรูปร่างแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับระยะเวลาการทับถม แหล่งกำเนิด และชนิดของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ ดังนั้นในการศึกษาควรคำนึงถึงทั้งลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของไดอะตอมไมท์ในแต่ละแหล่งกำเนิด

จากการค้นคว้าวรรณกรรมและงานวิจัยของ Aydin and Gul (2007) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไดอะตอมไมท์คอนกรีตจะต้องการน้ำเพิ่มขึ้น และทำให้ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นและขั้นปลายสูงขึ้นเนื่องจากไดอะตอมไมท์มีพื้นที่ผิวมากและอนุภาคค่อนข้างละเอียด

จากการค้นคว้าวรรณกรรมและงานวิจัยของ Demirboga and Gul (2003) พบว่าเมื่อความหนาแน่นของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นด้วย

จากการค้นคว้าวรรณกรรมและงานวิจัยของ Topcu and Isikdag (2007) พบว่าเพอร์ไลท์สามารถเผาและบดให้ละเอียดได้ง่ายกว่าปูนซีเมนต์ โดยเพอร์ไลท์สามารถถูกเผาเพื่อให้เกิดการขยายตัวได้ที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1100°C ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เผาที่อุณหภูมิ 1400 ถึง 1500°C ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่าเพอร์ไลท์ใช้พลังงานในการผลิตที่น้อยกว่า

จากการค้นคว้าวรรณกรรมและงานวิจัยของ ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (2550) พบว่าการใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ชนิดหยาบในส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบา ทำให้มีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง แต่กำลังอัดมีค่าสูงขึ้นตามอายุการบ่ม และจากคุณสมบัติที่เบา มีรูพรุนสูง สามารถลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต คอนกรีตมวลเบาที่แทนที่ทรายและปูนซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์ มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น 4.6 และ 3.8% ทุก 10% ของการแทนที่ และการแทนที่ทราย 40% มีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุด 1820 kg/m^3 มีค่ากำลังอัด 100 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน ส่วนคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์ชนิดหยาบแทนที่ทรายและปูนซีเมนต์มีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 20.0 และ 12.5% ทุก 10% ของการแทนที่ และเมื่อใช้เพอร์ไลท์ชนิดหยาบแทนที่ทราย 40% มีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุด 1115 kg/m^3 มีค่ากำลังอัด 73 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน วัน และเมื่อนำทั้งไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ชนิดหยาบมาผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิตได้เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์ 40% มีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุด 1915 kg/m^3 มีค่ากำลังอัด 102 ksc และเมื่อใช้เพอร์ไลท์ชนิดหยาบแทนที่ปูนซีเมนต์ 40% มีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุด 1640 kg/m^3 มีค่ากำลังอัด 108 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน

และเมื่อศึกษางานวิจัยของ ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (2550) ในเรื่องการนำไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ชนิดละเอียดมาใช้เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติในงานคอนกรีต พบว่าผลรวมองค์ประกอบหลักทางเคมี SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ของทั้งไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ชนิดละเอียด แสดงถึงคุณสมบัติการเป็นวัสดุปอซโซลาน ปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง แต่การพัฒนากำลังอัดมีค่าสูงขึ้นตามอายุการบ่ม ปริมาณที่เหมาะสมสามารถทำให้ได้กำลังอัดที่สูงที่สุด และจากคุณสมบัติที่เบา มีรูพรุนสูง ทำให้ลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตให้เบาลงสามารถลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง การแทนที่ทราย แทนที่ปูนซีเมนต์ และผสมเพิ่มด้วย ไดอะตอมไมท์ทุก 5% ส่งผลให้มีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 5.9, 3.9 และ 1.9% ตามลำดับ ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ไดอะตอมไมท์ผสมเพิ่ม 10% มีค่ากำลังอัดลดลง 25.4 และ 1.7% ของมอร์ต้าร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ และที่ปริมาณการผสมเพิ่ม 5 ถึง 10% คือค่าที่เหมาะสมที่สามารถทำให้กำลังอัดสูงสุด ส่วนเพอร์ไลท์ชนิดละเอียดมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากไดอะตอมไมท์ คือ มีลักษณะไม่เป็นผลึกหรือมีรูปร่างอสัณฐาน มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าไดอะตอมไมท์ การแทนที่ทราย แทนที่ปูนซีเมนต์ และผสมเพิ่มด้วยเพอร์ไลท์ชนิดละเอียดทุก 5% ส่งผลให้มีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 32.3, 17.9 และ 15.5% ตามลำดับ ค่ากำลังอัดที่ผสมเพิ่ม 5, 10 และ 15% มีค่าลดลงน้อยมากหรือมีค่าเพิ่มมากกว่ามอร์ต้าร์ควบคุมในบางช่วงอายุการบ่ม โดยการผสมเพิ่ม 5% มีค่ากำลังอัดลดลง 6.4 และมีค่าเพิ่มขึ้น 3.5 และ 7.1% ส่วนการผสมเพิ่ม 10% มีค่ากำลังอัดลดลง 17.9 และมีค่าเพิ่มสูงขึ้น 8.0 และ 15.9% ของมอร์ต้าร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ปริมาณการผสมเพิ่ม 5 ถึง 15% คือ ค่าที่เหมาะสมที่สามารถทำให้กำลังอัดสูงสุด ดังนั้นจึงสามารถกล่าวสรุปได้ว่า ทั้งการใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ชนิดละเอียดผสมเพิ่ม 10% โดยไม่ลดปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้ราคาคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นการผสมเพิ่ม จึงทำให้อัตราส่วน ปูนซีเมนต์ ทราย และหิน ลดลงตามไปด้วย จึงสามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ได้เพียงเล็กน้อย แต่ถ้าต้องการลดราคาก่อสร้างลงจะต้องใช้สารปอซโซลานโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์หรือแทนที่มวลรวม และถ้ามองถึงประโยชน์ด้านการลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ลง ทุกสัดส่วนผสมที่มีการนำวัสดุปอซโซลานทุกชนิดแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ลงได้ แต่ในการประยุกต์ใช้งานควรคำนึงถึงความเหมาะสมในเรื่องของความต้องการที่จะพยายามลดน้ำหนักของคอนกรีตหรือต้องการประหยัดราคาค่าก่อสร้าง

สรุปแนวทางวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตได้โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์หรือทรายซึ่งสามารถทำให้คอนกรีตมีหน่วยน้ำหนักลดลง และงานวิจัยนี้จะใช้ไดอะตอมไมท์จาก

จังหวัดลำปางและเพอร์ไลท์จากจังหวัดลพบุรี โดยจะทำการศึกษาลักษณะเบื้องต้นทางกายภาพและทางเคมีของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกลุ่มควบคุมจะทำตามวิธีของสถาบันคอนกรีตอเมริกัน (ACI) ให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัด 450 ksc ทดสอบโดยตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน ค่าการยุบตัวอยู่ระหว่าง 8 ถึง 10 cm เนื่องจากไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์มีขนาดอนุภาคเล็ก มีพื้นที่ผิวและความพรุนสูง จะส่งผลให้ความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่ากำลังอัดลดลง ดังนั้นจึงต้องใส่สารลดน้ำจำนวนมากเพื่อลดปริมาณน้ำในส่วนผสมและได้กำลังอัดที่เหมาะสม และซิลิกาฟูมเพื่อเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตทั้งช่วงต้นและช่วงปลาย โดยวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อหาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์หรือทรายด้วยไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักไม่เกิน 2000 kg/m^3 และมีกำลังอัดไม่ต่ำกว่า 300 ksc ของตัวอย่างรูปทรงกระบอก ที่อายุการบ่ม 28 วัน จะทำการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตเป็น 2 กลุ่ม คือ

1) ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ตามที่ออกแบบไว้และใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ผสมคอนกรีตโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์หรือทรายในอัตราส่วนผสม 0, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนัก

2) ถ้ากำลังอัดไม่ถึง 300 ksc จะเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์หรือออกแบบคอนกรีตกลุ่มควบคุมให้มีกำลังอัดสูงขึ้น

จากปัญหาของโครงสร้างคอนกรีตที่มีน้ำหนักค่อนข้างมากดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ 1.1 จึงมีแนวความคิดที่จะนำเอาไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ ซึ่งมีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำและมีความพรุนสูงมาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์หรือทราย เพื่อลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตโดยมีกำลังอัดที่เหมาะสมและได้ประโยชน์ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 1.5

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนและวิธีออกแบบคอนกรีตผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์เพื่อลดหน่วยน้ำหนัก โดยพยายามรักษากำลังอัดให้ไม่ต่ำกว่า 300 ksc เพื่อใช้ในงานโครงสร้างทั่วไป การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ

1) ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ตามที่ออกแบบไว้และใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ผสมคอนกรีตโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์หรือทรายในอัตราส่วนผสม 0, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนัก

2) ถ้ากำลังอัดไม่ถึง 300 ksc จะเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์หรือออกแบบคอนกรีตกลุ่มควบคุมให้มีกำลังอัดสูงขึ้น

ก่อนการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต จะศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุเพื่อใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต คือ ความถ่วงจำเพาะ ขนาดคละ ค่าหน่วยน้ำหนัก จากนั้นจะทดลองผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อระยะเวลาการก่อตัว กำลังอัด หน่วยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต และระหว่างรอให้คอนกรีตถึงอายุการบ่มจะทำการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพและเคมีของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ด้วยเครื่อง Laser Particle Size Analyzer, XRF, SEM, TEM, XRD และ TGA เพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนผลการทดลอง โดยผลการทดสอบจะเลือกค่าที่ใกล้เคียงกันที่สุด 2 ค่าจากทดสอบ 3 ครั้ง

3.2 การหาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 การหาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ ไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์

1) การหาความถ่วงจำเพาะโดยใช้ขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิแอร์ (le chatelier flask) จะทำตามมาตรฐาน ASTM C 188

2) การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคโดยใช้เครื่อง Laser Particle Size Analyzer

3) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

4) การถ่ายภาพขยายกำลังสูงวัสดุด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และ Transmission Electron Microscope (TEM)

5) การวิเคราะห์สถานะผลึกโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)

6) การวิเคราะห์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงของวัสดุตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อนระหว่างการเกิดปฏิกิริยาด้วยเครื่อง Thermo Gravimetric Analyzer (TGA)

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างการทดสอบความถ่วงจำเพาะ, Laser Particle Size, XRF, XRD, SEM, TEM และ TGA

ลำดับที่	ชนิดของวัสดุ	จำนวนตัวอย่างทดสอบ							รวม
		ความถ่วงจำเพาะ	Laser Particle Size	XRF	XRD	SEM	TEM	TGA	
1	ปูนซีเมนต์	3	3	3	3	3	3	3	21
2	ไดอะตอมไมท์	3	3	3	3	3	3	3	21
3	เพอร์ไลท์	3	3	3	3	3	3	3	21
รวมตัวอย่างทั้งสิ้น									63

3.2.3 การทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม

1) การหาสารอินทรีย์ที่เจือปนมากับมวลรวม จะทำตามมาตรฐาน ASTM C 40

2) การหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวม จะทำตามมาตรฐาน ASTM C 127 และ ASTM C 128

3) การหาขนาดคละของมวลรวม จะทำตามมาตรฐาน ASTM C 136

4) การหาค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวม จะทำตามมาตรฐาน ASTM C 29

ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวอย่างทดสอบสารอินทรีย์เจือปน ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ ขนาดคละ และหน่วยน้ำหนัก

ลำดับที่	ชนิดของมวลรวม	จำนวนตัวอย่างทดสอบ				รวม
		สารอินทรีย์เจือปน	ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ	ขนาดคละ	หน่วยน้ำหนัก	
1	หยาบ	3	3	3	3	12
2	ละเอียด	3	3	3	3	12
รวมตัวอย่างทั้งสิ้น						24

3.3 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

3.3.1 กำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

อัตราส่วนผสมของคอนกรีตโครงสร้างมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ในงานวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดสัญลักษณ์ไว้ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สัญลักษณ์ของแต่ละสัดส่วนผสม

สัดส่วนผสม	สัญลักษณ์
คอนกรีตควบคุม	CSR
แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์ 30%	SD30CR
แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์ 40%	SD40CR
แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์ 50%	SD50CR
แทนที่ทรายด้วยไดอะตอมไมท์ 30%	CD30SR
แทนที่ทรายด้วยไดอะตอมไมท์ 40%	CD40SR
แทนที่ทรายด้วยไดอะตอมไมท์ 50%	CD50SR
แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลท์ 30%	SP30CR
แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลท์ 40%	SP40CR
แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลท์ 50%	SP50CR
แทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 30%	CP30SR
แทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 40%	CP40SR
แทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 50%	CP50SR

หมายเหตุ : C หมายถึง ปูนซีเมนต์
S หมายถึง ทราย
R หมายถึง หิน
D หมายถึง ไดอะตอมไมท์
P หมายถึง เพอร์ไลท์

3.3.2 ข้อกำหนดและความต้องการในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตจะใช้วิธีของสถาบันคอนกรีตอเมริกัน (ACI) ให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัด 450 ksc ทดสอบโดยตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน ค่าการยุบตัวอยู่ระหว่าง 8 ถึง 10 cm มวลรวมหยาบที่ใช้เป็นหินปูนขนาด ¾ in. (20 mm) น้ำที่ใช้เป็นน้ำประปา คุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่ใช้ในการทำคอนกรีตมีดังนี้

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมคอนกรีตเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15

มวลรวมหยาบหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้งและกระทุ้งแน่นเท่ากับ 1511 kg/m^3 ความถ่วงจำเพาะ (อิ่มตัวผิวแห้ง) เท่ากับ 2.70

ทรายมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.40 ความถ่วงจำเพาะ (อิ่มตัวผิวแห้ง) เท่ากับ 2.63

3.3.3 ขั้นตอนในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ขั้นที่ 1 ค่ายุบตัว

กำหนดค่ายุบตัว 8 ถึง 10 cm

ขั้นที่ 2 ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ

กำหนดขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ ¾ in. (20 mm)

ขั้นที่ 3 ประมาณน้ำและฟองอากาศ

เลือกคอนกรีตที่ไม่ใส่สารกักฟองกระจายอากาศ เนื่องจากประเทศไทยไม่มีปัญหาของการแข็งตัวและละลายน้ำสลับกัน จากตารางการออกแบบเลือกค่ายุบตัว 8 ถึง 10 cm จึงเลือกใช้หินปูนขนาด 20 mm อ่านปริมาณน้ำเท่ากับ 200 kg/m^3 และปริมาณฟองอากาศเท่ากับ 2%

ขั้นที่ 4 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

กำหนดกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 450 ksc จากตารางการออกแบบเลือกน้ำต่อปูนซีเมนต์กับ 0.38

ขั้นที่ 5 คำนวณปริมาณปูนซีเมนต์

ปริมาณปูนซีเมนต์หาจากความสัมพันธ์ W/C = 0.38

ดังนั้น $C = 200/0.38 = 526\ kg/m^3$

ขั้นที่ 6 หาปริมาณมวลรวมหยาบ

จากตารางการออกแบบอัตราส่วนของมวลรวมหยาบในสภาพแห้งและกระทุ้งแน่นต่อปริมาตรของคอนกรีตเท่ากับ 0.66 สำหรับค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย 2.40 ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ 20 mm ดังนั้นน้ำหนักของมวลรวมหยาบแห้งที่ใช้เท่ากับ $0.66 \times 1511 = 997\ kg/m^3$

ขั้นที่ 7 หาปริมาณทรายและปฏิภาคส่วนผสมโดยปริมาตร

คำนวณปริมาตรทรายจากปริมาตรของส่วนผสมทั้งหมดในคอนกรีต 1 m^3

น้ำ	=	0.200 m^3
ปูนซีเมนต์ = 526/ (3.15×1000)	=	0.167 m^3
ฟองอากาศ 2% ในปริมาตรของคอนกรีต	=	0.020 m^3
มวลรวมหยาบ (หินปูน) = 997/ (2.70×1000)	=	0.369 m^3
รวมปริมาตรน้ำ, ปูนซีเมนต์, ฟองอากาศ และมวลรวมหยาบ	=	0.756 m^3
ปริมาตรส่วนที่เหลือเป็นทราย = 1-0.756	=	0.244 m^3
น้ำหนักของทราย = 0.244×2.63×1000	=	643 kg

ขั้นที่ 8 สรุปอัตราส่วนผสมคอนกรีตที่ต้องการ ใน 1 m^3

น้ำ	=	200 kg
ปูนซีเมนต์	=	526 kg
มวลรวมหยาบ (หินปูน)	=	997 kg
ทราย	=	643 kg

น้ำหนักส่วนผสมคอนกรีตแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ปริมาณของส่วนผสมต่าง ๆ ของคอนกรีต

	Water (kg)	Cement (kg)	Rock (kg)	Sand (kg)	Diatomite (kg)	Perlite (kg)	Silica Fume (kg)	Super Platicizer (kg)	Volume (m^3)
CSR	200	526	997	643	0	0	79	5.3	1.00
SD30CR	400	368	997	643	158	0	79	5.3	1.24
SD40CR	440	316	997	643	210	0	79	5.3	1.29
SD50CR	480	263	997	643	263	0	79	5.3	1.33
CD30SR	350	526	997	450	193	0	79	5.3	1.18
CD40SR	500	526	997	386	257	0	79	5.3	1.34
CD50SR	600	526	997	322	322	0	79	5.3	1.44
SP30CR	400	368	997	643	0	158	79	5.3	1.45
SP40CR	550	316	997	643	0	210	79	5.3	1.68
SP50CR	700	263	997	643	0	263	79	5.3	1.91
CP30SR	400	526	997	450	0	193	79	5.3	1.49
CP40SR	490	526	997	386	0	257	79	5.3	1.67
CP50SR	625	526	997	322	0	322	79	5.3	1.90

การออกแบบส่วนผสมที่ใช้การแทนที่ปูนซีเมนต์หรือทรายโดยน้ำหนักทำให้ปริมาตรของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์มีค่าน้อยกว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์และทราย ดังนั้นจึงปรับแก้ปริมาณส่วนผสมคอนกรีตเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีปริมาตร 1 m^3 แสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ปริมาณของส่วนผสมต่าง ๆ ต่อคอนกรีต 1 m^3

	Water (kg)	Cement (kg)	Rock (kg)	Sand (kg)	Diatomite (kg)	Perlite (kg)	Silica Fume (kg)	Super Platicizer (kg)	Volume (m^3)
CSR	200	526	997	643	0	0	79	5.3	1.00
SD30CR	323	297	804	519	127	0	64	4.2	1.00
SD40CR	341	245	773	498	163	0	61	4.1	1.00
SD50CR	361	198	750	483	198	0	59	4.0	1.00
CD30SR	297	446	850	381	164	0	67	4.5	1.00
CD40SR	373	393	744	288	192	0	59	4.0	1.00
CD50SR	417	365	692	224	224	0	55	3.7	1.00
SP30CR	276	254	688	443	0	109	54	3.7	1.00
SP40CR	327	188	593	383	0	125	47	3.2	1.00
SP50CR	367	138	522	337	0	138	41	2.8	1.00
CP30SR	268	353	669	302	0	130	53	3.6	1.00
CP40SR	293	315	597	231	0	154	47	3.2	1.00
CP50SR	329	277	525	169	0	169	42	2.8	1.00

จากตารางที่ 4.7 พบว่าเมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ตามที่ออกแบบไว้และใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ผสมคอนกรีตโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์หรือทรายในอัตราส่วนผสม 0, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนัก ทุกส่วนผสมมีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่า 300 ksc จึงทำการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม โดยพิจารณากำลังอัดและหน่วยน้ำหนักไม่เกิน 2000 kg/m^3 พบว่ากำลังอัดลดลงประมาณ 50% ของคอนกรีตกลุ่มควบคุม จึงทำการออกแบบส่วนผสมใหม่โดยเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% ของปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการออกแบบและใช้เพอร์ไลท์ผสมคอนกรีตโดยการแทนที่ทรายในอัตราส่วนผสม 0, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนัก และไม่มีซิลิกาฟูมในส่วนผสมเพื่อลดราคาในการผลิต แสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.6 สัญลักษณ์ของแต่ละสัดส่วนผสมใหม่

สัดส่วนผสม	สัญลักษณ์
คอนกรีตควบคุมเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25% ของ CSR	1.25CSR*
คอนกรีตควบคุมเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 50% ของ CSR	1.50CSR*
เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25% ของ CSRและแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 30%	1.25CP30SR*
เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25% ของ CSRและแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 40%	1.25CP40SR*
เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25% ของ CSRและแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 50%	1.25CP50SR*
เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 50% ของ CSRและแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 30%	1.50CP30SR*
เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 50% ของ CSRและแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 40%	1.50CP40SR*
เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 50% ของ CSRและแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 50%	1.50CP50SR*

หมายเหตุ : * ไม่มีซิลิกาฟูมในส่วนผสม

ตารางที่ 3.7 ปริมาณของส่วนผสมต่าง ๆ ของคอนกรีตที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50%

	Water (kg)	Cement (kg)	Rock (kg)	Sand (kg)	Perlite (kg)	Super Platicizer (kg)	Volume (m^3)
1.25CSR	156	658	997	643	0	5.3	0.98
1.50CSR	195	789	997	643	0	5.3	1.06
1.25CP30SR	322	658	997	450	193	5.3	1.42
1.25CP40SR	350	658	997	386	257	5.3	1.54
1.25CP50SR	473	658	997	322	322	5.3	1.75
1.50CP30SR	348	789	997	450	193	5.3	1.49
1.50CP40SR	380	789	997	386	257	5.3	1.61
1.50CP50SR	512	789	997	322	322	5.3	1.83

ตารางที่ 3.8 ปริมาณของส่วนผสมต่าง ๆ ที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% ต่อคอนกรีต 1 m^3

	Water (kg)	Cement (kg)	Rock (kg)	Sand (kg)	Perlite (kg)	Super Platicizer (kg)	Volume (m^3)
1.25CSR	159	671	1017	656	0	5.4	1.0
1.50CSR	184	742	941	607	0	5.0	1.0
1.25CP30SR	227	463	702	317	136	3.7	1.0
1.25CP40SR	227	427	647	251	167	3.4	1.0
1.25CP50SR	270	376	570	184	184	3.0	1.0
1.50CP30SR	234	530	670	302	130	3.6	1.0
1.50CP40SR	236	490	619	240	160	3.3	1.0
1.50CP50SR	280	431	545	176	176	2.9	1.0

3.4 การศึกษาผลกระทบของไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ต่อกำลังอัด หน่วยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

3.4.1 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสด

1) การหาค่ายุบตัวของคอนกรีต เป็นการทดสอบวัดความสามารถเทได้ของคอนกรีตสด จะทำตามมาตรฐาน ASTM C 143

2) การหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต จะทำตามมาตรฐาน ASTM C 403

3) การหาหน่วยน้ำหนักคอนกรีตสด จะทำตามมาตรฐาน ASTM C 138

ตารางที่ 3.9 จำนวนตัวอย่างทดสอบระยะเวลาก่อตัวและหน่วยน้ำหนัก

ลำดับที่	อัตราส่วน (C : S : N) (% by weight)	จำนวนตัวอย่างทดสอบ		รวม
		ระยะเวลาก่อตัว	หน่วยน้ำหนัก	
1	100 : 100 : 0	3	3	6
2	100 : 70 : 30	6	6	12
3	100 : 60 : 40	6	6	12
4	100 : 50 : 50	6	6	12
5	70 : 100 : 30	6	6	12
6	60 : 100 : 40	6	6	12
7	50 : 100 : 50	6	6	12
8	125 : 100 : 0	3	3	6
9	125 : 70 : 30	3	3	6
10	125 : 60 : 40	3	3	6
11	125 : 50 : 50	3	3	6
12	150 : 100 : 0	3	3	6
13	150 : 70 : 30	3	3	6
14	150 : 60 : 40	3	3	6
15	150 : 50 : 50	3	3	6
			รวมตัวอย่างทั้งสิ้น	126

หมายเหตุ : N หมายถึง ไดอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลท์

3.4.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตแข็งตัว

1) การทดสอบกำลังอัดตัวอย่างทดสอบจะทำตามมาตรฐาน ASTM C 39 ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm ตัวอย่างจะถูกถอดออกจากแบบเมื่ออายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทดสอบ ที่อายุ 1, 7, 14, 28 และ 60 วัน

2) การหาหน่วยน้ำหนักตัวอย่างทดสอบจะทำตามมาตรฐาน ASTM C 642 ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm ตัวอย่างจะถูกถอดออกจากแบบเมื่ออายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทดสอบ ที่อายุ 1, 7, 14, 28 และ 60 วัน

3) การทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะทำตามมาตรฐาน ASTM C 469 ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm ตัวอย่างจะถูกถอดออกจากแบบเมื่ออายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทดสอบ ที่อายุ 28 และ 60 วัน

4) การทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตจะทำตามมาตรฐาน ASTM C 642 ตัวอย่างจะถูกถอดออกจากแบบเมื่ออายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทดสอบ ที่อายุ 1, 7, 14, 28 และ 60 วัน

ตารางที่ 3.10 จำนวนตัวอย่างทดสอบกำลังอัด หน่วยน้ำหนักและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้ไดอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์และ/หรือทราย

ลำดับที่	อัตราส่วน (C : S : N) (% by weight)	จำนวนตัวอย่างที่อายุการบ่มต่าง ๆ				รวม
		1 วัน	7 วัน	28 วัน	60 วัน	
1	100 : 100 : 0	3	3	3	3	12
2	100 : 70 : 30	6	6	6	6	24
3	100 : 60 : 40	6	6	6	6	24
4	100 : 50 : 50	6	6	6	6	24
5	70 : 100 : 30	6	6	6	6	24
6	60 : 100 : 40	6	6	6	6	24
7	50 : 100 : 50	6	6	6	6	24
รวมตัวอย่างทั้งสิ้น						156

ตารางที่ 3.11 จำนวนตัวอย่างทดสอบกำลังอัด หน่วยน้ำหนักและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

ลำดับที่	อัตราส่วน (C : S : P) (% by weight)	จำนวนตัวอย่างที่อายุการบ่มต่าง ๆ				รวม
		1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	
1	125 : 100 : 0	3	3	3	3	12
2	125 : 70 : 30	3	3	3	3	12
3	125 : 60 : 40	3	3	3	3	12
4	125 : 50 : 50	3	3	3	3	12
5	150 : 100 : 0	3	3	3	3	12
6	150 : 70 : 30	3	3	3	3	12
7	150 : 60 : 40	3	3	3	3	12
8	150 : 50 : 50	3	3	3	3	12
รวมตัวอย่างทั้งสิ้น						96

ตารางที่ 3.12 จำนวนตัวอย่างทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่ใช้ไดอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์และ/หรือทราย

ลำดับที่	อัตราส่วน (C : S : N) (% by weight)	จำนวนตัวอย่างที่อายุการบ่มต่าง ๆ				รวม
		1 วัน	7 วัน	28 วัน	60 วัน	
1	100 : 100 : 0	3	3	3	3	12
2	100 : 70 : 30	6	6	6	6	24
3	100 : 60 : 40	6	6	6	6	24
4	100 : 50 : 50	6	6	6	6	24
5	70 : 100 : 30	6	6	6	6	24
6	60 : 100 : 40	6	6	6	6	24
7	50 : 100 : 50	6	6	6	6	24
รวมตัวอย่างทั้งสิ้น						156

ตารางที่ 3.13 จำนวนตัวอย่างทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

ลำดับที่	อัตราส่วน (C : S : P) (% by weight)	จำนวนตัวอย่างที่อายุการบ่มต่าง ๆ				รวม
		1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	
1	125 : 100 : 0	3	3	3	3	12
2	125 : 70 : 30	3	3	3	3	12
3	125 : 60 : 40	3	3	3	3	12
4	125 : 50 : 50	3	3	3	3	12
5	150 : 100 : 0	3	3	3	3	12
6	150 : 70 : 30	3	3	3	3	12
7	150 : 60 : 40	3	3	3	3	12
8	150 : 50 : 50	3	3	3	3	12
รวมตัวอย่างทั้งสิ้น						96

บทที่ 4
ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ผลการศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังอัด ค่าหน่วยน้ำหนัก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ของคอนกรีตผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม ที่อายุการบ่มต่าง ๆ รวมถึงการวิเคราะห์เปรียบเทียบราคา เพื่อหาความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

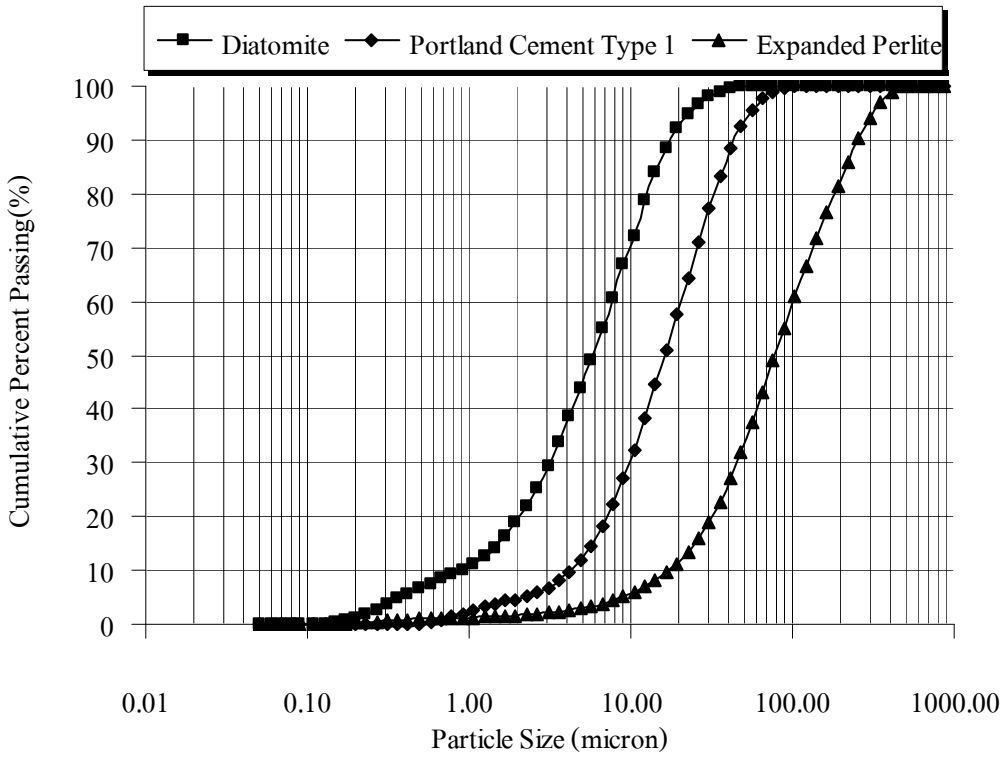
4.1 ลักษณะทางกายภาพของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์

ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์กับปูนซีเมนต์และทราย ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์และทราย โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.74 และ 0.18 เท่าของปูนซีเมนต์และเท่ากับ 0.89 และ 0.21 เท่าของทราย ตามลำดับ โดยที่ไดอะตอมไมท์มีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าเพอร์ไลท์ประมาณ 4.18 เท่า แสดงว่าไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์น่าจะทำให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลดลงได้เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและมีความพรุนสูง

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์

	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	ทราย	ไดอะตอมไมท์	เพอร์ไลท์
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.63	2.34	0.56
หน่วยน้ำหนักแห้ง (kg/m^3)	1450	1524	537-769	168-205
อนุภาคขนาดกลาง (μm)	16.2	-	5.8	77.8

จากผลการทดสอบ Laser Particle Size ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าไดอะตอมไมท์มีอนุภาคขนาดกลาง (median particle size, d_{50}) เท่ากับ 5.8 µm ซึ่งเล็กกว่าปูนซีเมนต์ที่มีขนาด d_{50} เท่ากับ 16.2 µm อยู่ 2.8 เท่า แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการแทรกเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นได้ ส่วนเพอร์ไลท์มีขนาด d_{50} เท่ากับ 77.8 µm ซึ่งใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ 4.8 เท่า เนื่องจากไดอะตอมไมท์มีอนุภาคที่ละเอียด และเพอร์ไลท์มีความพรุนสูงอาจทำให้คอนกรีตต้องการน้ำในส่วนผสมมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่ากำลังลดลง และเมื่อพิจารณาการกระจายขนาดอนุภาคของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์พบว่ามีการกระจายขนาดอนุภาคค่อนข้างดีคล้ายกับปูนซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ไดอะตอมไมท์ และเพอร์ไลท์

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ไดอะตอมไมท์ และเพอร์ไลท์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า

1) ไดอะตอมไมท์ มีปริมาณสารประกอบหลัก $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ = 87.8% ปริมาณ SO_3 = 159 ppm และมีค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อน (LOI) 8.1%

2) เพอร์ไลท์ มีปริมาณสารประกอบหลัก $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ = 85.6% ปริมาณ SO_3 = 158 ppm และมีค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อน 1.0%

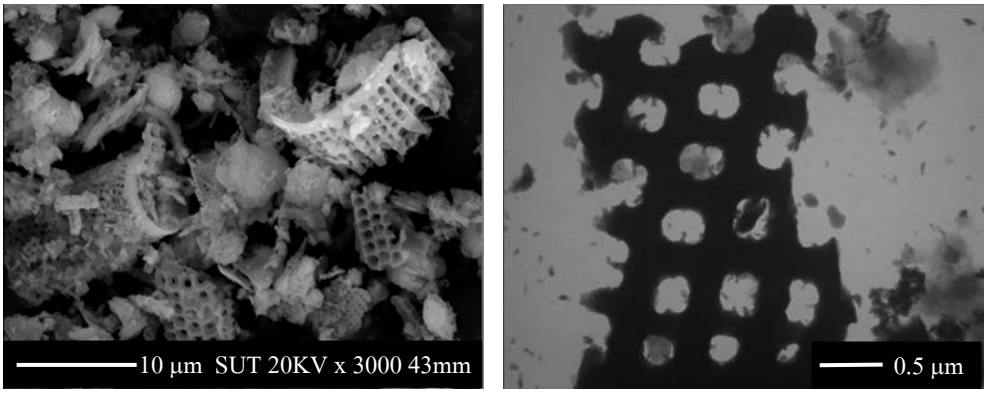
จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าไดอะตอมไมท์ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเผาและเพอร์ไลท์ที่ผ่านการเผาที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้จัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ตามระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 (2001)

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)

ปริมาณออกไซด์ (%)	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	ไดอะตอมไมท์	เพอร์ไลท์
SiO_2	18.1	59.3	73.7
Al_2O_3	3.5	10.0	9.2
Fe_2O_3	3.6	18.5	2.8
CaO	67.5	1.2	1.7
K_2O	0.6	1.9	10.0
TiO_2	0.2	0.6	0.5
SO_3	3.3	159 ppm	158 ppm
Loss on Ignition (LOI)	1.5	8.1	1.0

4.3 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และชนิดส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3

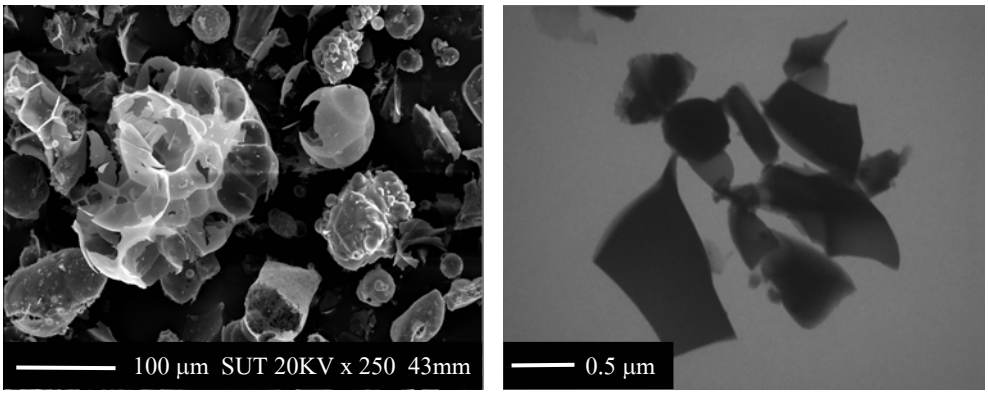


(ก) (ข)

รูปที่ 4.2 (ก) ภาพถ่าย SEM ของไดอะตอมไมท์
(ข) ภาพถ่าย TEM ของไดอะตอมไมท์

พบว่าไดอะตอมไมท์ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเผาหรือบด มีลักษณะอนุภาคเป็นแท่งทรงกระบอกกลวง มีผนังลักษณะเป็นโครงข่ายที่ค่อนข้างสมบูรณ์และเป็นระเบียบคล้ายรังผึ้ง มีความพรุนสูง ขนาดอนุภาคประมาณ 5 ถึง 25 µm ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) และ (ข)

จากรูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) พบว่าเพอร์ไลท์มีขนาดอนุภาคประมาณ 60 ถึง 300 µm ลักษณะอนุภาคแบบกลวงกลม เปราะ มีลักษณะเป็นโครงข่าย บางอนุภาคมีลักษณะคล้ายเปลือกไข่และมีความพรุนสูงเนื่องจากผ่านกระบวนการเผาเพื่อให้เกิดการขยายตัว



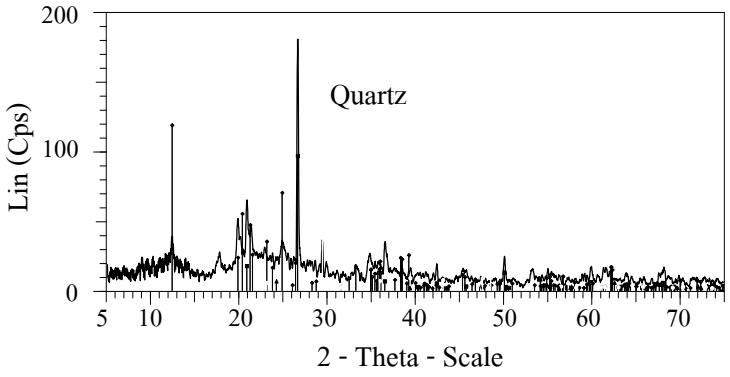
(ก) (ข)

รูปที่ 4.3 (ก) ภาพถ่าย SEM ของเพอร์ไลท์
(ข) ภาพถ่าย TEM ของเพอร์ไลท์

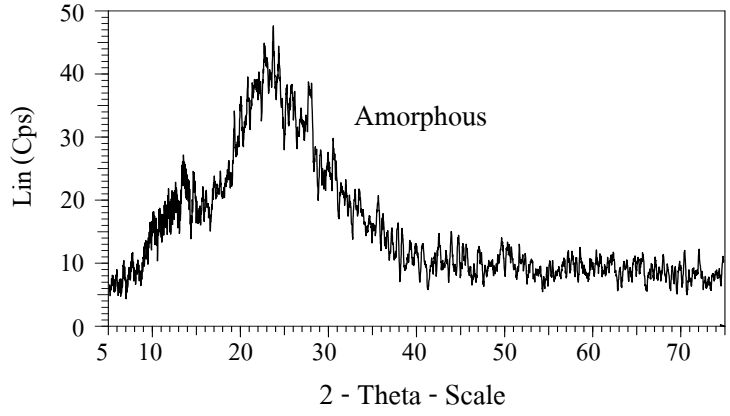
จากลักษณะอนุภาคของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ ดังกล่าว เมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตจึงน่าจะทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักที่ลงเบาได้ แต่เนื่องจากความพรุนที่สูงนี้ทำให้ความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมมากขึ้น ซึ่งทำให้ค่ากำลังอัดลดลง จึงควรใช้สารลดน้ำจำนวนมากในส่วนผสมเพื่อลดปริมาณน้ำ และให้ได้ค่ากำลังอัดที่ดีขึ้น

4.4 ความเป็นผลึกของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์

จากผลการทดสอบความเป็นผลึกของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Analysis (XRD) พบว่าไดอะตอมไมท์มีลักษณะความเป็นผลึก (crystalline) ของ quartz ปะปนอยู่ ส่วนเพอร์ไลท์มีลักษณะไม่เป็นผลึกหรือมีรูปร่างอสัณฐาน (amorphous) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ซึ่งความเป็นอสัณฐานนี้สามารถบ่งบอกได้ถึงความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก และเพอร์ไลท์มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าไดอะตอมไมท์



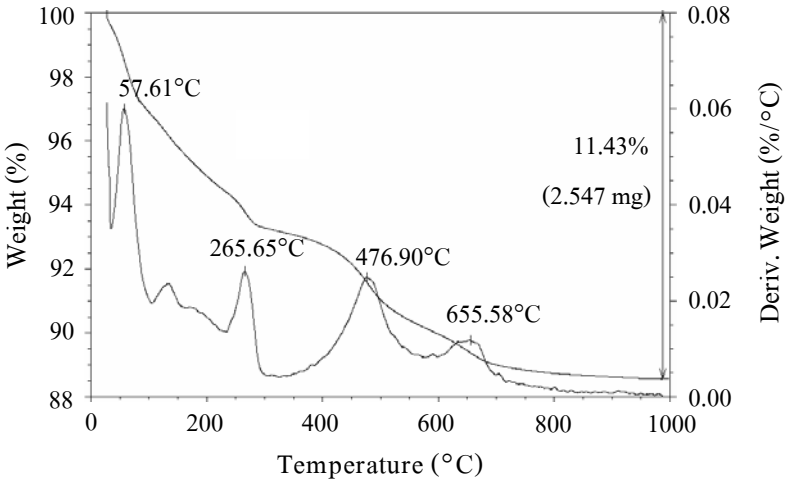
รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของไดอะตอมไมท์



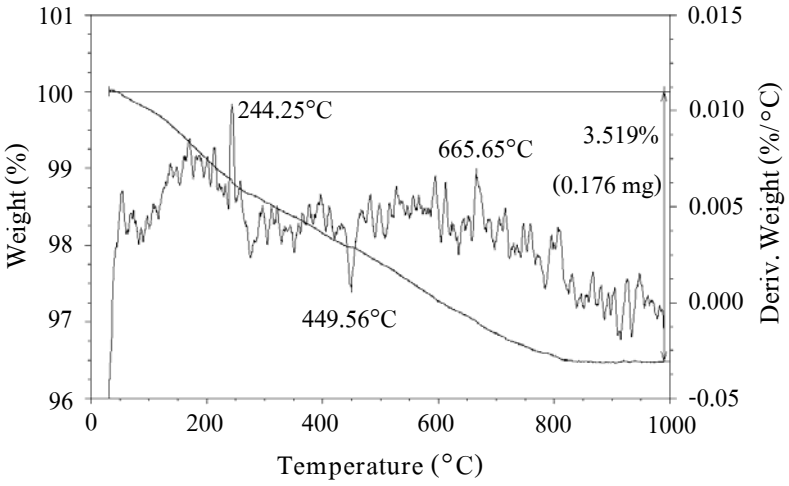
รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของเพอร์ไลท์

4.5 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ด้วยเครื่อง Thermal Gravimetric Analysis (DTA/TGA) โดยเผาที่อุณหภูมิ 1000°C พบว่าไดอะตอมไมท์มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักค่อนข้างมากประมาณ 11.4% เนื่องจากไดอะตอมไมท์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ไม่ได้ผ่านกระบวนการเผา ส่วนเพอร์ไลท์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักประมาณ 3.5% ซึ่งค่อนข้างน้อย เนื่องจากเพอร์ไลท์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ผ่านกระบวนการเผาแล้วที่อุณหภูมิประมาณ 900 ถึง 1100 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของไดอะตอมไมท์สัมพัทธ์กับอุณหภูมิ

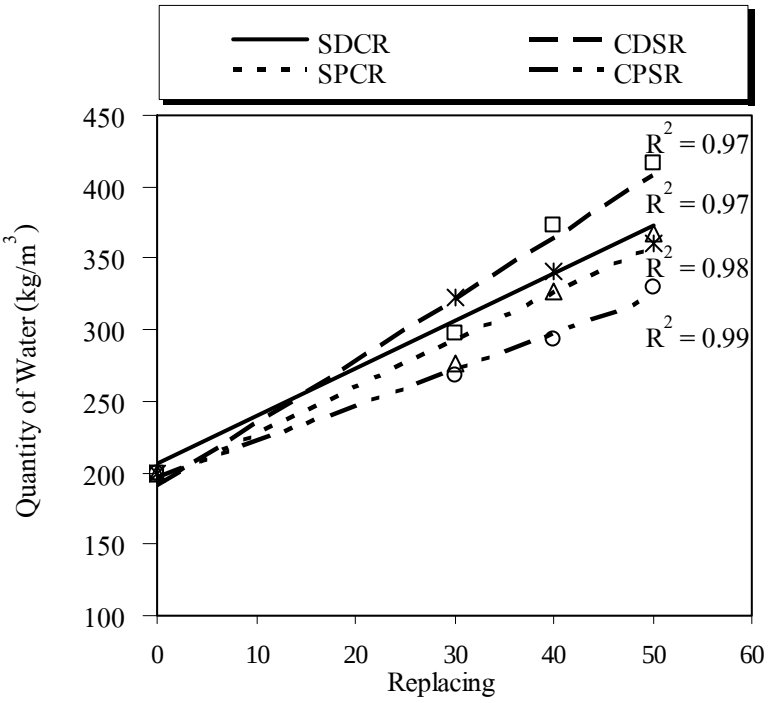


รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเพอร์ไลท์สัมพัทธ์กับอุณหภูมิ

4.6 ผลกระทบของปริมาณน้ำที่มีต่อคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์

1) ปริมาณน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์

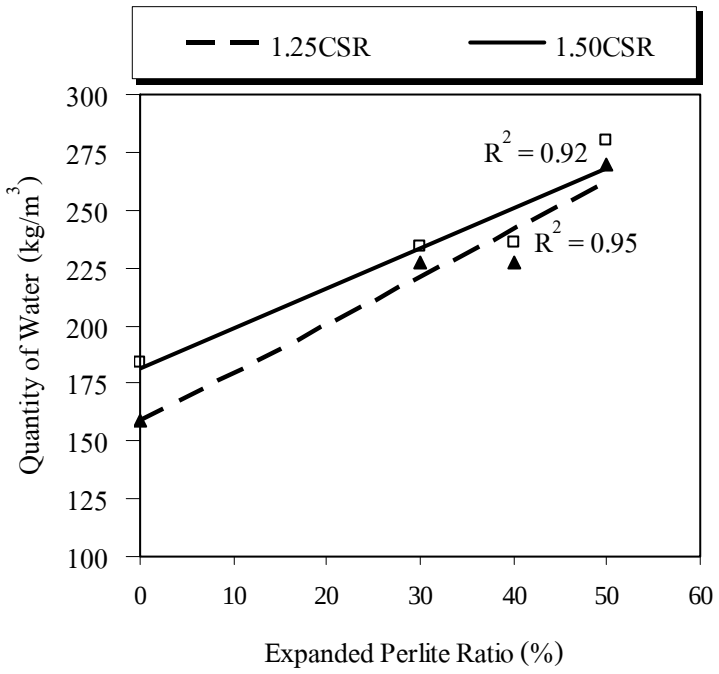
ปริมาณการเพิ่มขึ้นทั้งของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเพิ่มปริมาณน้ำ เนื่องจากในการทดสอบนี้มีการควบคุมปริมาณน้ำที่สามารถทำให้คอนกรีตมวลเบามีค่ายุบตัวระหว่าง 8 ถึง 10 cm โดยส่วนผสมที่ใช้ไดอะตอมไมท์มีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 16.0 และ 22.6% ส่วนเพอร์ไลท์มีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น 17.0 และ 12.7% ทุก 10% ของการแทนที่ปูนซีเมนต์หรือทรายด้วยไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณน้ำของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ปริมาณน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์

2) ปริมาณน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย ส่งผลกระทบโดยตรงต่อความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมเช่นเดียวกับการใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์หรือทรายในส่วนผสม โดยทุก 10% ของการแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์จะส่งผลให้มีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 13.1 และ 9.6% เปรียบเทียบกับค่าปริมาณน้ำของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ปริมาณน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

ถึงแม้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำจะส่งผลดีต่อความสามารถเทได้ แต่จะมีผลเสียโดยตรงต่อกำลังอัด เนื่องจากค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดลดลง การนำไปประยุกต์ใช้ควรคำนึงถึง W/C และ W/B ที่เพิ่มขึ้นด้วย เพราะปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อกำลังอัด

3) ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมวลเบาพบว่าส่วนผสมจะต้องการปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการแทนที่ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ในปริมาณมากขึ้นเนื่องจากไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์มีอนุภาคที่ละเอียดและมีความพรุนสูง จึงส่งผลให้ W/C และ W/B เพิ่มมากขึ้นและทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตทั้งขั้นต้น (initial setting time) และขั้นปลาย (final setting time) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์มีระยะเวลาการก่อตัวทั้งขั้นต้นและขั้นปลายสูงกว่าการแทนที่ทรายด้วยไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ที่ปริมาณการแทนที่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.3 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์

	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B)	ระยะเวลาการก่อตัว (min)	
		ขั้นต้น	ขั้นปลาย
CSR	0.33	245	350
SD30CR	0.66	353	540
SD40CR	0.73	545	955
SD50CR	0.80	600	1180
SP30CR	0.66	*	*
SP40CR	0.91	*	*
SP50CR	1.16	*	*

หมายเหตุ : * ไม่สามารถวัดค่าได้

ตารางที่ 4.4 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์แทนที่ทราย

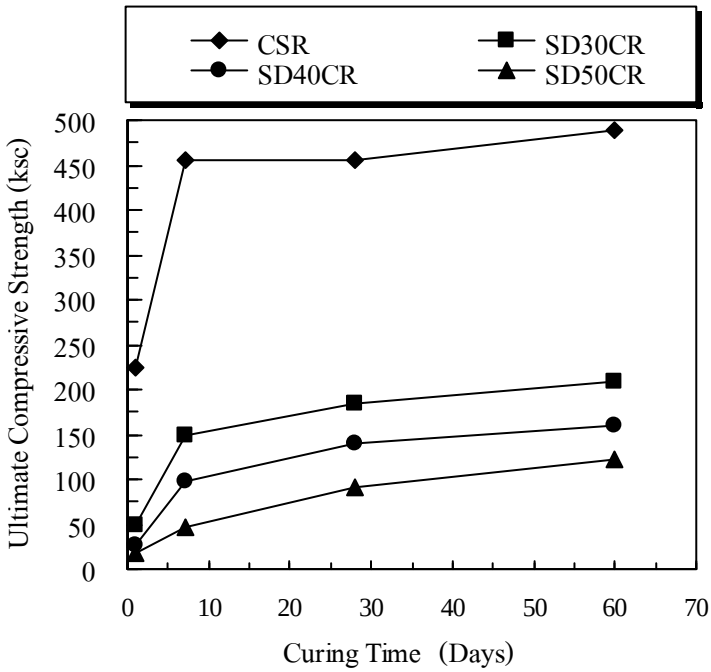
	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C)	ระยะเวลาการก่อตัว (min)	
		ขั้นต้น	ขั้นต้น
CSR	0.38	245	350
CD30SR	0.67	185	292
CD40SR	0.95	272	407
CD50SR	1.14	347	545
CP30SR	0.76	320	532
CP40SR	0.93	385	683
CP50SR	1.19	530	835
1.25CSR	0.24	147	205
1.50CSR	0.25	183	290
1.25CP30SR	0.49	255	394
1.25CP40SR	0.53	275	404
1.25CP50SR	0.72	280	425
1.50CP30SR	0.44	243	373
1.50CP40SR	0.48	243	384
1.50CP50SR	0.65	365	550

4.7 คุณสมบัติด้านกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ สามารถแยกวิเคราะห์ได้ ดังนี้

1) กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์

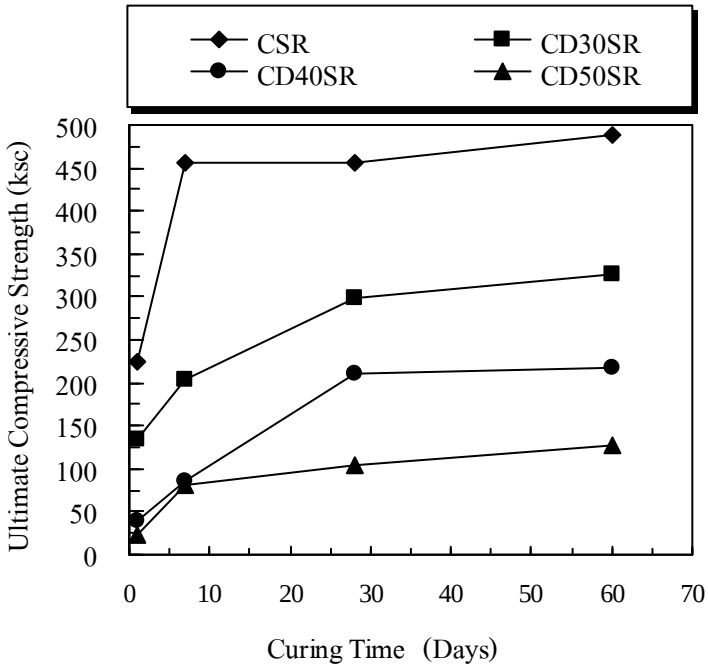
จากรูปที่ 4.10 พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์มีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 30% มีค่าสูงที่สุด 184 และ 208 ksc ซึ่งมีค่าลดลง 59.7 และ 57.5% และเมื่อใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 50% มีค่าน้อยที่สุด 92 และ 123 ksc ซึ่งมีค่าลดลง 79.9 และ 74.9% ของคอนกรีตควบคุมที่อายุการบ่ม 28 และ 60 วัน ตามลำดับ และการพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับคอนกรีตควบคุม



รูปที่ 4.10 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์

2) กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ทราย

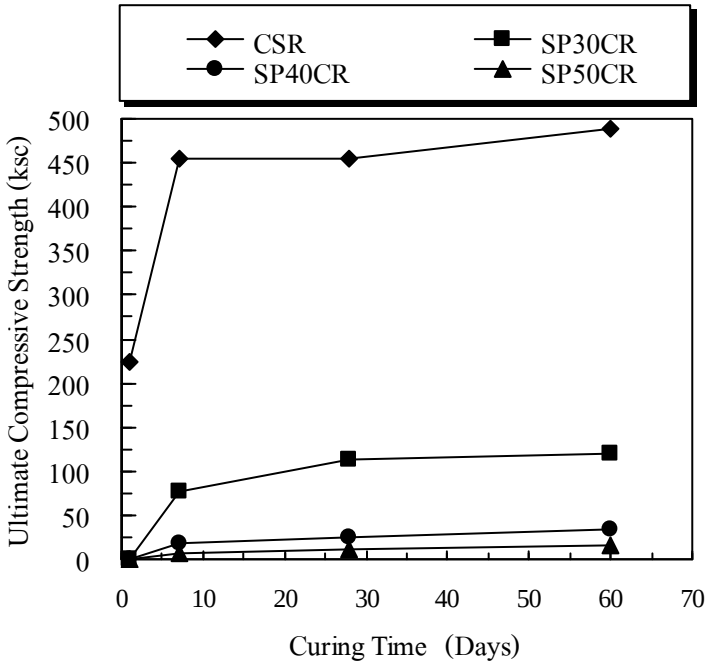
กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ทรายมีลักษณะคล้ายคลึงกับกราฟการแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยค่ากำลังอัดลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ทรายที่เพิ่มขึ้น ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ทราย 30% มีค่าสูงที่สุด 298 และ 326 ksc ซึ่งมีค่าลดลง 34.5 และ 33.3% และเมื่อใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ทราย 50% มีค่าน้อยที่สุด 105 และ 127 ksc ซึ่งมีค่าลดลง 76.9 และ 74.0% ของคอนกรีตควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 และ 60 วัน ตามลำดับ และการพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับคอนกรีตควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ทราย

3) กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์

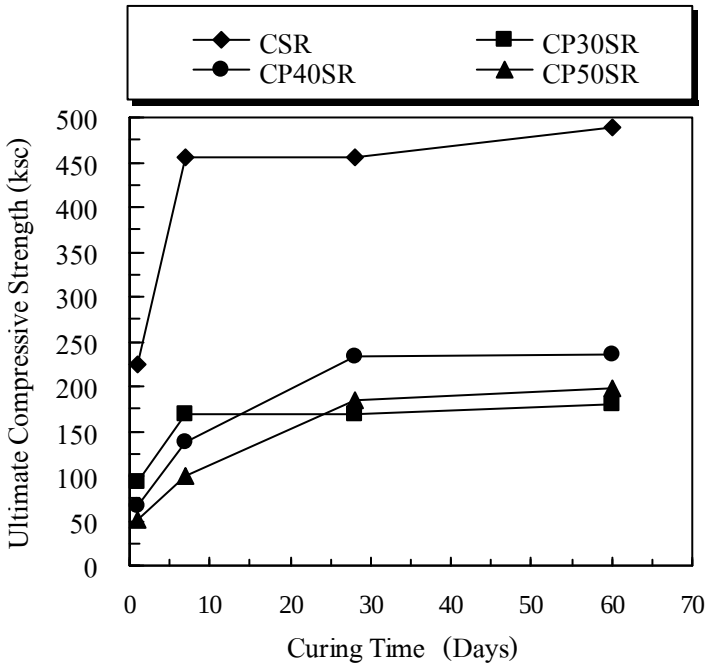
จากรูปที่ 4.12 พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์เป็นแทนที่ปูนซีเมนต์ มีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับคอนกรีตควบคุม ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 30% มีค่ากำลังอัดสูงที่สุด 114 และ 120 ksc มีค่าลดลง 75.0 และ 75.5% และเมื่อใช้เพอร์ไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 50% มีค่ากำลังอัดน้อยที่สุด 11 และ 15 ksc มีค่าลดลง 97.6 และ 96.9% ของคอนกรีตควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 และ 60 วัน ตามลำดับ การลดลงของค่ากำลังอัดที่ค่อนข้างมากเนื่องมาจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลท์ในปริมาณที่มากเกินไปจึงทำให้ปูนซีเมนต์ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.12 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์

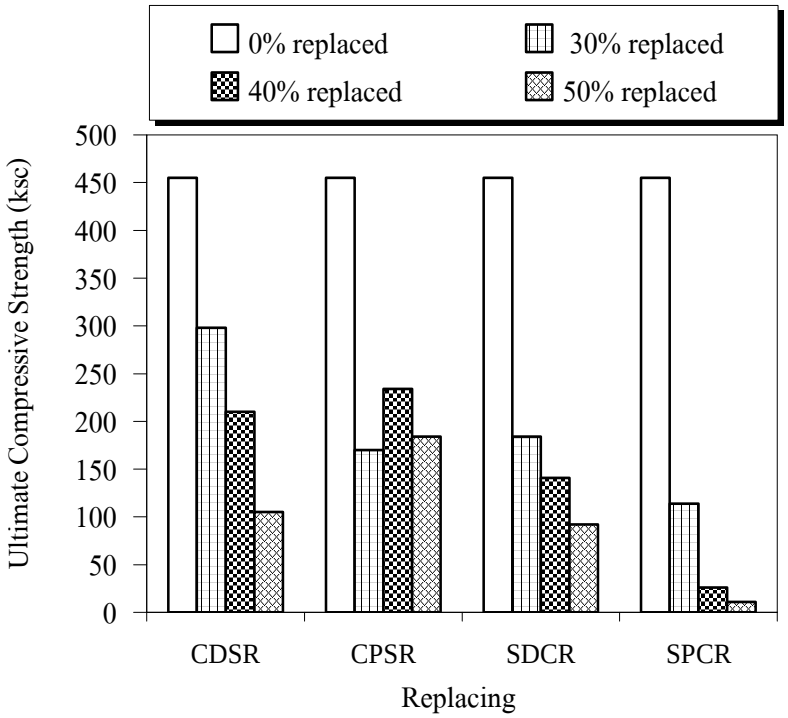
4) กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

จากรูปที่ 4.13 พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทรายมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ทรายเพิ่มขึ้น ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 40% มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่ากำลังอัดสูงที่สุด 234 และ 235 ksc ซึ่งมีค่าลดลง 48.57 และ 51.94% ที่อายุการบ่ม 28 และ 60 วันตามลำดับ แต่ที่การแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 30% หลังจากอายุ 7 วัน มีการพัฒนากำลังอัดน้อยมากและมีค่ากำลังอัดต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 40 และ 50% โดยมีค่ากำลังอัดประมาณ 170, 170 และ 181 ksc ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม 62.64, 62.64 และ 62.99% ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 60 วัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 30% นี้มีการพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกที่ค่อนข้างรวดเร็ว แต่การพัฒนากำลังอัดภายหลังอายุ 7 วัน มีค่าน้อยมาก ซึ่งคล้ายกับคอนกรีตควบคุม ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปริมาณซิลิกาฟูมที่ค่อนข้างสูงจึงทำให้การพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกสูง



รูปที่ 4.13 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

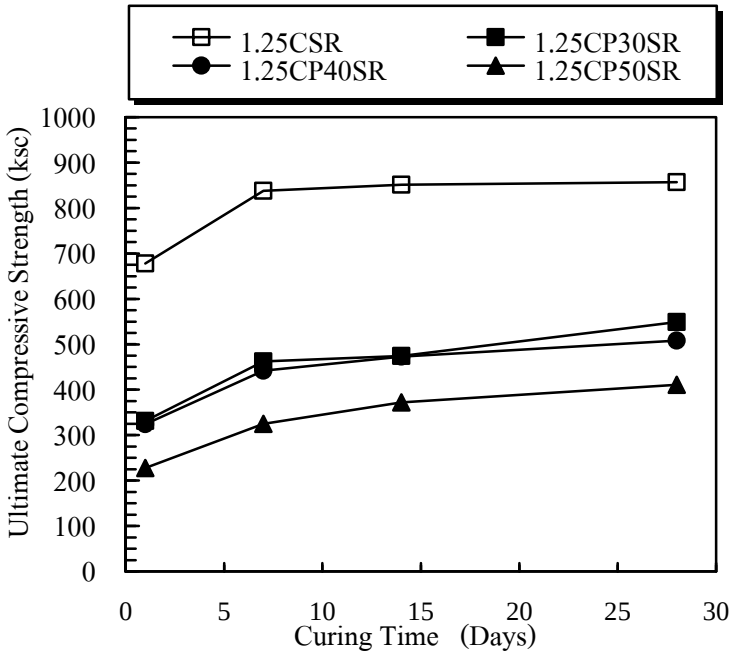
เมื่อพิจารณากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์เปรียบเทียบกับเพอร์ไลท์ พบว่าการแทนที่ทรายด้วยไดอะตอมไมท์ให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าเพอร์ไลท์ 75.3% ที่การแทนที่ 30% แต่เมื่อการแทนที่ทรายด้วยเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มมากขึ้นคือที่ 40 และ 50% พบว่าไดอะตอมไมท์ให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าเพอร์ไลท์ 10.3 และ 42.9% ตามลำดับ ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์พบว่าการแทนที่ด้วยเพอร์ไลท์ให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าการแทนที่ด้วยไดอะตอมไมท์ 38.0, 81.6 และ 88.0% ที่การแทนที่ 30, 40 และ 50% ตามลำดับ เนื่องจากเพอร์ไลท์มีความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมมากกว่าไดอะตอมไมท์ ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) สูงกว่าจึงส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลงมากกว่าการแทนที่ด้วยไดอะตอมไมท์ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และเมื่อพิจารณาคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ในส่วนผสมโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์หรือทรายในอัตราส่วนผสม 0, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนัก พบว่าทุกส่วนผสมมีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่า 300 ksc จึงทำการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์

5) กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

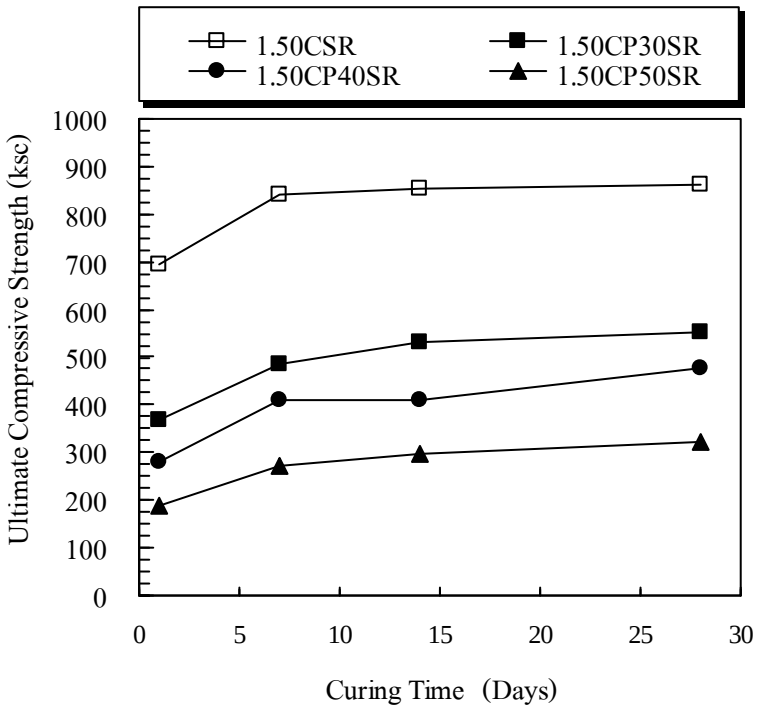
จากรูปที่ 4.15 พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทรายมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ทรายเพิ่มขึ้น ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 30% มีค่าสูงที่สุด 549 ksc ซึ่งมีค่าลดลง 35.9% และเมื่อใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 50% มีค่าน้อยที่สุด 411 ksc ซึ่งมีค่าลดลง 52.0% ของคอนกรีตควบคุมที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25% ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ และการพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับคอนกรีตควบคุม



รูปที่ 4.15 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

6) กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

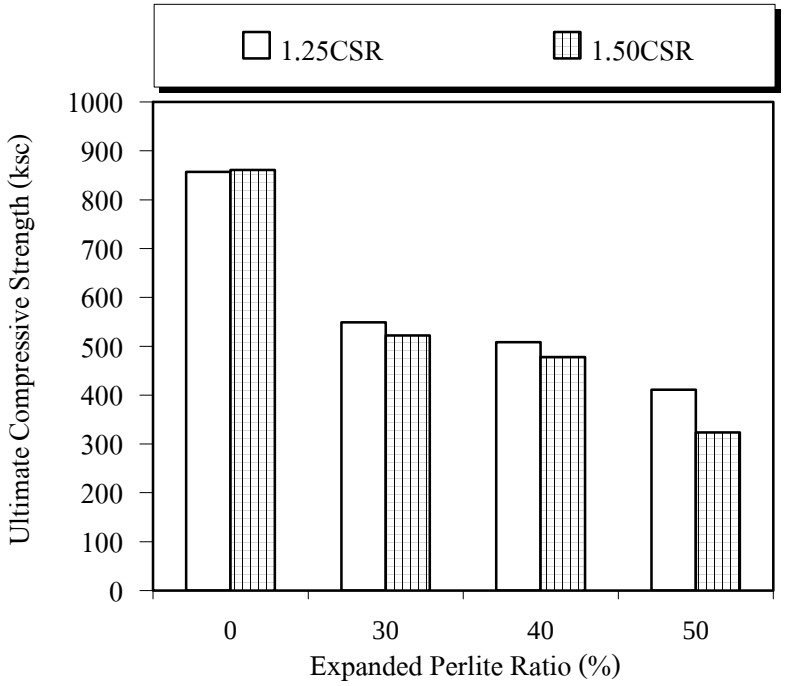
จากรูปที่ 4.16 พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทรายมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ทรายเพิ่มขึ้น ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 30% มีค่าสูงที่สุด 552 ksc ซึ่งมีค่าลดลง 35.6% และเมื่อใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 50% มีค่าน้อยที่สุด 324 ksc ซึ่งมีค่าลดลง 62.4% ของคอนกรีตควบคุมเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 50% ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ และการพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับคอนกรีตควบคุม



รูปที่ 4.16 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

เมื่อพิจารณากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% ในส่วนผสมให้ค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกันมาก โดยการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25% ให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 50% เพียงเล็กน้อย คือ 0.46 และ 0.54% ที่การแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 0 และ 30% ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาการแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ที่เพิ่มมากขึ้นพบว่าการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25% ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 50% ในส่วนผสม คือ 6.3 และ 27.0% ที่การแทนที่ 40 และ 50% ตามลำดับ ซึ่งอาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25% มีความสามารถเทได้ดีกว่า จึงอัดแน่นได้ดีกว่าการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 50% ส่งผลให้ค่ากำลังอัดและหน่วยน้ำหนักมีค่ามากกว่า

อย่างไรก็ตามในการพิจารณาค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ในส่วนผสมยังมีปัจจัยอื่นที่ควรคำนึงถึงด้วย เช่น ค่าหน่วยน้ำหนัก ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ค่าการดูดซึมน้ำ เป็นต้น ซึ่งต้องคำนึงถึงเพื่อความต้องการคอนกรีตมวลเบาที่มีค่ากำลังอัดและหน่วยน้ำหนักเหมาะสมต่อการใช้งาน



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

4.8 หน่วยน้ำหนัก

1) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์

เมื่อพิจารณาค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์หรือทรายมีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำกว่าไดอะตอมไมท์ เนื่องจากเพอร์ไลท์มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าไดอะตอมไมท์ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และพบว่ามีบางส่วนผสมมีค่าหน่วยน้ำหนักที่ต่ำกว่า 2000 kg/m^3 แต่จากผลการทดสอบด้านกำลังอัดพบว่าไม่มีส่วนผสมใดมีค่ากำลังอัดถึง 300 ksc ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในข้อ 4.7

ตารางที่ 4.5 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์

อายุการบ่ม (days)	หน่วยน้ำหนักแห้ง (kg/m^3)			
	1	7	28	60
CSR	2418	2343	2267	2102
SD30CR	2135	2216	2176	2176
SD40CR	2095	2124	2060	2124
SD50CR	2051	2055	2075	2049
CD30SR	2175	2285	2211	2201
CD40SR	2025	2054	2055	2050
CD50SR	1940	2051	2014	1978
SP30CR	1784	1834	1848	1867
SP40CR	1665	1739	1817	1779
SP50CR	1516	1565	1618	1629
CP30SR	1931	1979	1980	1924
CP40SR	1807	1819	1832	1779
CP50SR	1698	1735	1741	1708

หมายเหตุ : หน่วยน้ำหนักที่ทดสอบเป็นหน่วยน้ำหนักแห้งในอากาศ (air dry unit weight)

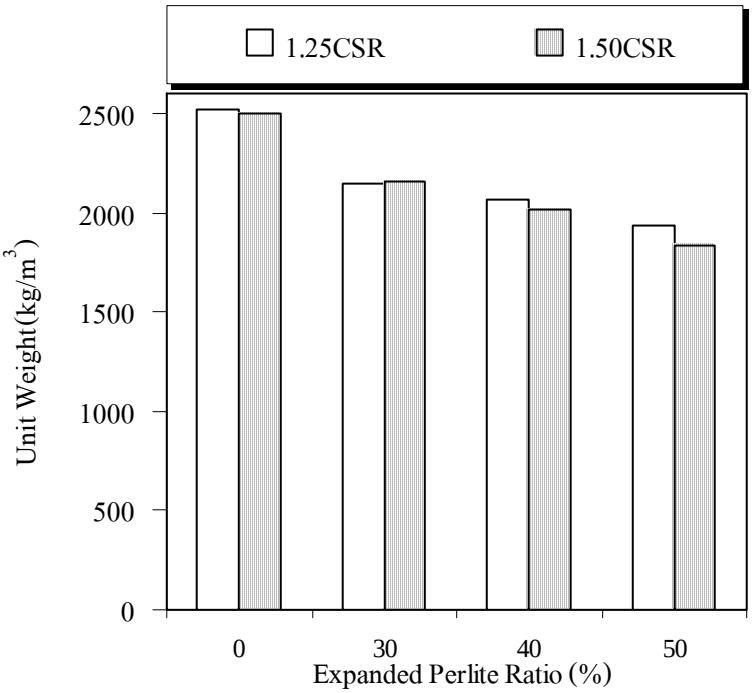
2) หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

เมื่อพิจารณาค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% พบว่าการแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 50% ให้ค่าหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุด คือ 1917 และ1783 kg/m^3 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% อยู่ 22.7 และ 27.5% ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และทุกส่วนผสมมีค่ากำลังอัดมากกว่า 300 ksc ดังที่ได้กล่าวไปแล้วให้ข้อ 4.7

ตารางที่ 4.6 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

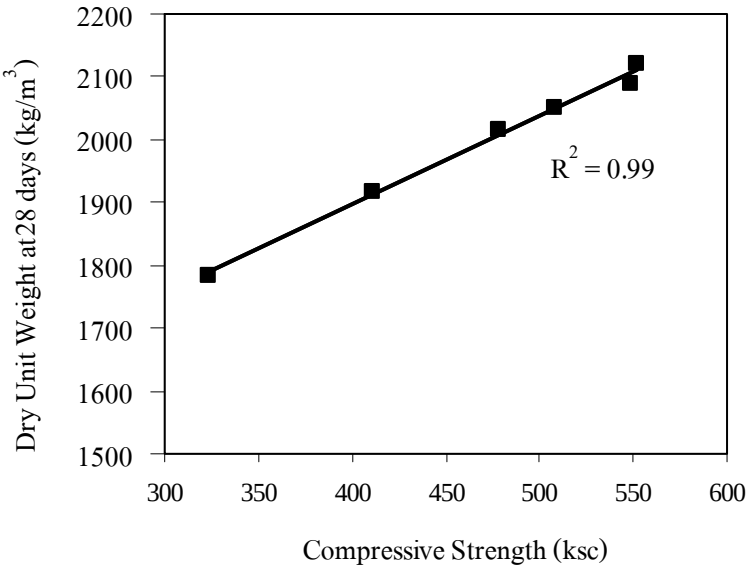
อายุการบ่ม (days)	หน่วยน้ำหนักสด (kg/m^3)	หน่วยน้ำหนักแห้ง (kg/m^3)			
		1	7	14	28
1.25CSR	2523	2429	2459	2467	2479
1.50CSR	2504	2435	2451	2437	2458
1.25CP30SR	2150	2099	2111	2098	2089
1.25CP40SR	2069	2020	2070	2055	2051
1.25CP50SR	1932	1919	1914	1927	1917
1.50CP30SR	2159	2118	2126	2126	2121
1.50CP40SR	2014	1911	2007	1986	2015
1.50CP50SR	1831	1758	1792	1775	1783

เมื่อพิจารณาหน่วยน้ำหนักที่อายุการบ่ม 28 วัน ของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่าการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% ในส่วนผสมให้ค่าหน่วยน้ำหนักที่ใกล้เคียงกันมาก โดยการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25% ให้ค่าหน่วยน้ำหนักที่ต่ำกว่าการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 50% เพียงเล็กน้อย คือ 1.51% ที่การแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 30% แต่เมื่อพิจารณาที่การแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์เพิ่มมากขึ้นพบว่าการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25% ให้ค่าหน่วยน้ำหนักที่สูงกว่าการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 50% ในส่วนผสม คือ 1.79 และ 7.52% ที่การแทนที่ 40 และ 50% ตามลำดับ เนื่องจากส่วนผสมที่มีการเพิ่มปูนซีเมนต์ 50% มีความข้นมากกว่า จึงทำให้การกระทุ้งเข้าแบบทำได้ยากกว่า จึงส่งผลให้มีโพรงอากาศเนื่องจากการอัดแน่น (entrapped air) ภายในเนื้อคอนกรีตมีมากกว่า โดยพิจารณาจากค่าหน่วยน้ำหนักสดและหน่วยน้ำหนักแห้งของส่วนผสมที่มีการเพิ่มปูนซีเมนต์ 25% ซึ่งมีค่ามากกว่าส่วนผสมที่มีการเพิ่มปูนซีเมนต์ 50%



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักแห้งของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

จากผลการทดสอบค่ากำลังอัดและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทรายที่อายุการบ่ม 28 วัน สามารถนำมาเขียนความสัมพันธ์ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ซึ่งจะสามารถช่วยในการพิจารณาค่ากำลังอัดและหน่วยน้ำหนักที่เหมาะสมต่อการใช้งาน



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์กำลังอัดกับหน่วยน้ำหนักแห้งของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

4.9 การจำแนกคอนกรีตมวลเบา

จากข้อ 2.2 สามารถจำแนกคอนกรีตมวลเบาตามหน่วยน้ำหนัก ได้ดังนี้

- คอนกรีตมวลเบาชนิดทำเป็นฉนวน มีค่าหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 315 ถึง 1100 kg/m^3 และมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ระหว่าง 7 ถึง 70 ksc
- คอนกรีตมวลเบาชนิดทำเป็นโครงสร้าง มีค่าหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 1400 ถึง 1800 kg/m^3 และมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ไม่ต่ำกว่า 170 ksc
- คอนกรีตชนิดกึ่งมวลเบา มีค่าหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 1800 ถึง 2050 kg/m^3 และมีค่ากำลังอัดไม่ต่ำกว่า 220 ksc (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

ตารางที่ 4.7 จำแนกคอนกรีตมวลเบาตามหน่วยน้ำหนัก

	กำลังอัดประลัย (ksc)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)	ชนิดของคอนกรีต
CSR	455	2267	ปกติ
SD30CR	184	2176	-
SD40CR	141	2060	-
SD50CR	92	2075	-
CD30SR	298	2211	ปกติ
CD40SR	210	2055	-
CD50SR	105	2014	-
SP30CR	114	1848	-
SP40CR	26	1817	-
SP50CR	11	1618	-
CP30SR	170	1980	-
CP40SR	234	1832	กึ่งมวลเบา
CP50SR	184	1741	มวลเบา
1.25CSR	857	2479	ปกติ
1.50CSR	861	2458	ปกติ
1.25CP30SR	549	2089	-
1.25CP40SR	508	2051	กึ่งมวลเบา
1.25CP50SR	411	1917	กึ่งมวลเบา
1.50CP30SR	552	2121	-
1.50CP40SR	478	2015	-
1.50CP50SR	324	1783	มวลเบา

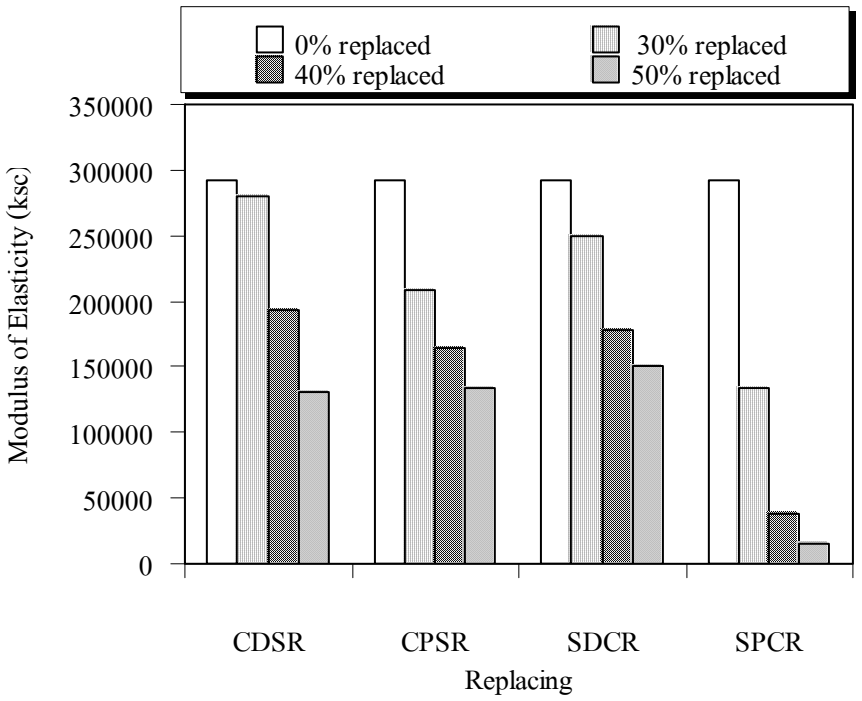
จากตารางที่ 4.7 พบว่าตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ในการศึกษานี้มีเพียง 2 สัดส่วนผสมที่จำแนกได้ว่าเป็นคอนกรีตมวลเบา คือ แทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 50% (CP50SR) และเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 50% (1.50CP50SR) โดยตัวอย่างอื่น ๆ ที่เหลือสามารถจำแนกได้เป็น คอนกรีตปกติ คอนกรีตกึ่งมวลเบา และไม่สามารถจำแนกได้เนื่องจากคุณสมบัติไม่เข้าตามข้อกำหนด และเมื่อพิจารณาตัวอย่างที่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ คือ คอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักไม่เกิน 2000 kg/m^3 และมีกำลังอัดไม่ต่ำกว่า 300 ksc พบว่ามี 2 สัดส่วนผสม คือ

เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 50% (1.25CP50SR) ซึ่งจำแนกได้เป็นคอนกรีตกึ่งมวลเบา และเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 50% (1.50CP50SR) ซึ่งจำแนกได้เป็นคอนกรีตมวลเบา

4.10 โมดูลัสยืดหยุ่น

1) โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์

จากรูปที่ 4.20 พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ทั้งการแทนที่ปูนซีเมนต์หรือทราย ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเมื่อแทนที่ในปริมาณเพิ่มมากขึ้น และพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์หรือทรายด้วยเพอร์ไลท์จะได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ต่ำกว่าการแทนที่ด้วยไดอะตอมไมท์

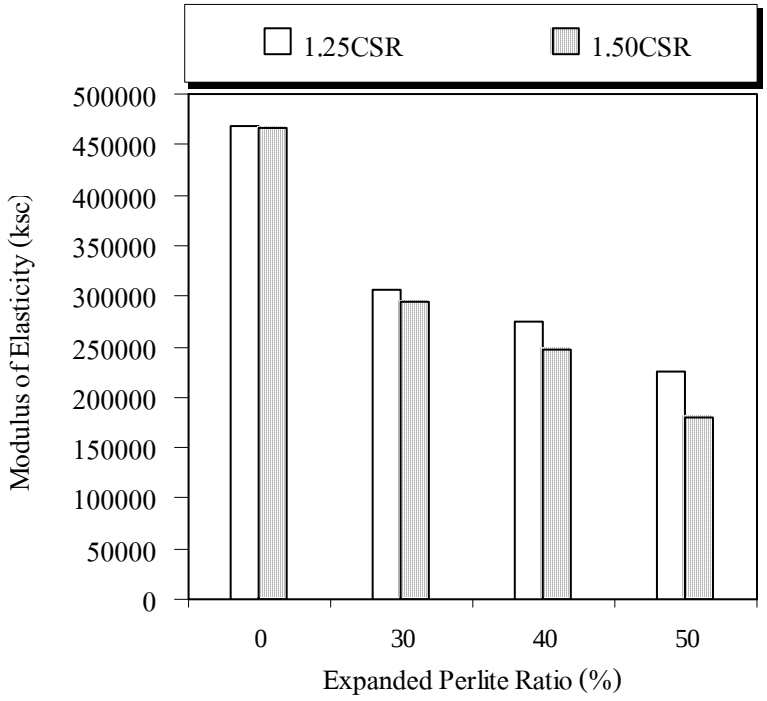


รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์

2) โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

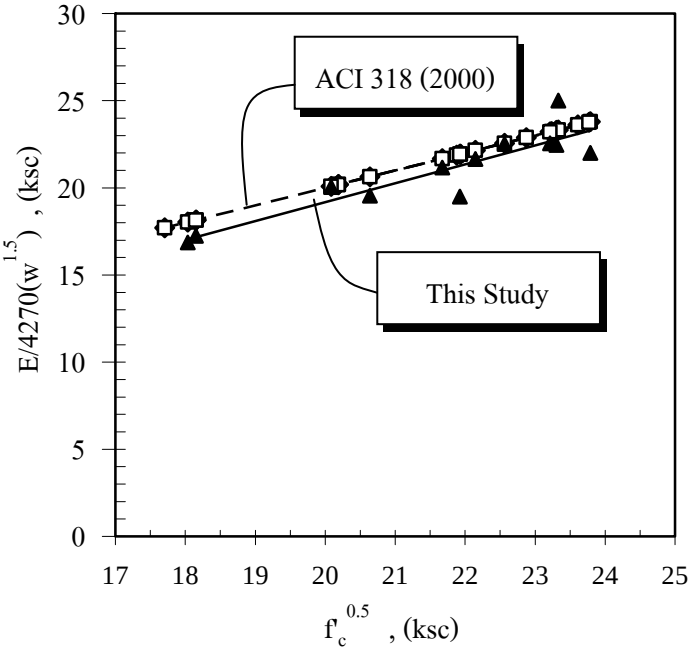
จากรูปที่ 4.21 พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าลดลงเมื่อแทนที่เพิ่มมากขึ้น

และพบว่าการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25% ให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงกว่าการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 50% ทุกปริมาณการแทนที่ในส่วนผสม โดยเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25% จะได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 306286 ksc และเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 50% จะได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 294303 ksc ที่ปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 30% เท่ากันซึ่งมีค่าลดลง 34.5 และ 37.0% ของคอนกรีตควบคุมที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% ตามลำดับ

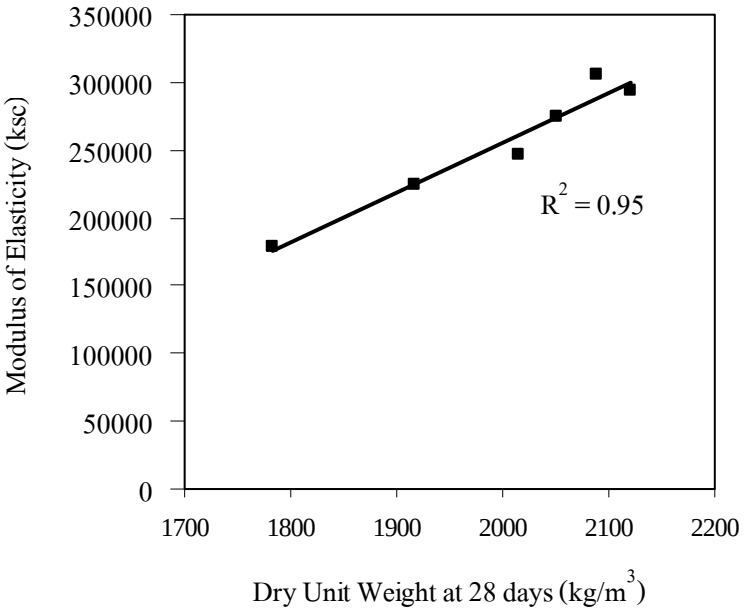


รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย ที่อายุการบ่ม 28 วัน เปรียบเทียบกับสมการของ ACI 318 (2000) พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำกว่าเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจากผลการทดสอบเห็นควรว่าในเบื้องต้นสมการที่ใช้ทำนายค่าโมดูลัสยืดหยุ่นนำมาใช้ในการคำนวณนี้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะมากขึ้นเมื่อหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.23

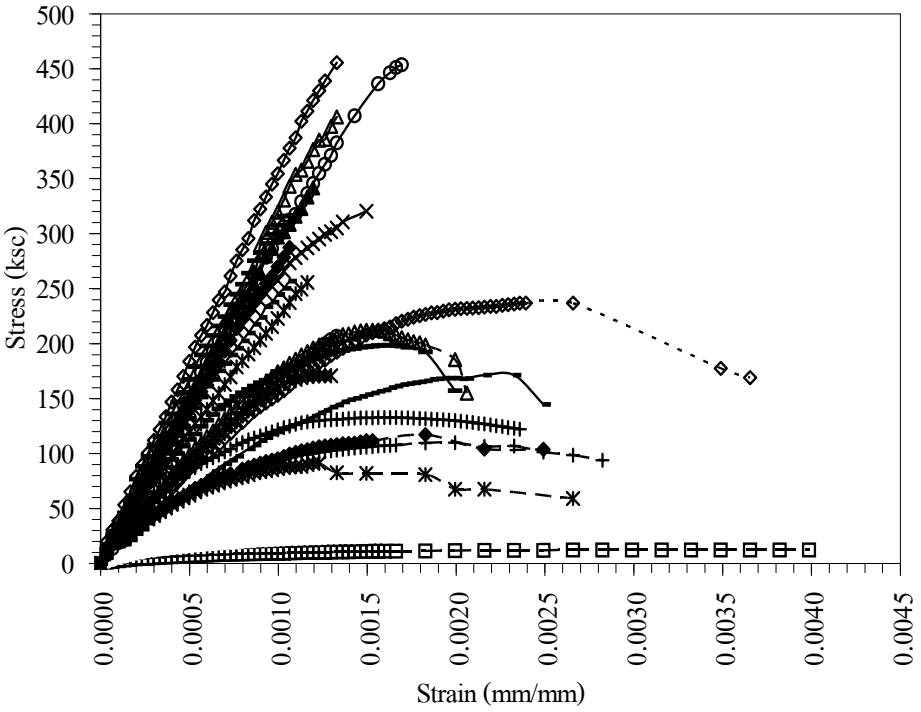


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์โมดูลัสยืดหยุ่นกับกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์โมดูลัสยืดหยุ่นกับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ในการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 4.24 พบว่าเมื่อปริมาณไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์เพิ่มมากขึ้น กำลังอัดจะลดลงแต่ความเครียดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เส้นกราฟจะมีลักษณะคล้ายพาราโบลาคว่ำ คล้ายกับคอนกรีตน้ำหนักทั่วไป และจะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการรับกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงเริ่มต้นจะเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) จนกระทั่งกำลังอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมีค่าประมาณ 40% ของกำลังอัดประลัย หลังจากนั้นตัวอย่างทดสอบจะเริ่มเกิดรอยแตกร้าว (microcrack) อย่างต่อเนื่องจนทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความเครียดมีลักษณะแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) โดยเส้นกราฟจะมีความชันลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งมีค่าความชันเท่ากับศูนย์เมื่อกำลังอัดมีค่าสูงสุด จากนั้นกำลังอัดของตัวอย่างทดสอบจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ตัวอย่างทดสอบเกิดการแตกร้าวอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจะสังเกตได้จากเส้นกราฟที่ค่อย ๆ ตกลงจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ และพบว่าคอนกรีตที่มีกำลังต้านทานกำลังอัดสูง กำลังอัดจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเลยจากกำลังอัดสูงสุดไปแล้ว แต่คอนกรีตที่มีกำลังต้านทานกำลังอัดต่ำกว่า กำลังอัดจะลดลงอย่างช้า ๆ และมีค่าความเครียดสูงสุดมากกว่า ซึ่งแสดงว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำกว่าจะมีความเหนียว (ductility) มากกว่าคอนกรีตที่มีกำลังสูง



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์หน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตมวลเบา

จากการสังเกตลักษณะการวิบัติ พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ จะมีการวิบัติเกิดขึ้นได้ทั้งสามลักษณะ คือ แบบเฉือนหรือรูปกรวย แบบผ่าซีกหรือแนวตรง และแบบระเบิด ดังแสดงในรูปที่ 4.25 (ก) ถึง (ค) ตามลำดับ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา และปริมาณการแทนที่ของทั้งไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ คอนกรีตมวลเบาที่มีค่ากำลังอัดอยู่ในช่วง 100 ถึง 300 ksc จะมีลักษณะการวิบัติแบบเฉือนหรือรูปกรวย คอนกรีตมวลเบาที่ผสมเพอร์ไลท์ที่มีค่ากำลังอัดอยู่ในช่วง 300 ถึง 600 ksc จะมีลักษณะการวิบัติแบบผ่าซีกหรือแนวตรง ส่วนคอนกรีตควบคุมที่มีค่ากำลังอัดสูง ที่อยู่ในช่วง 600 ถึง 850 ksc จะมีลักษณะการวิบัติแบบระเบิด ซึ่งพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบในการทดสอบแรงกดอัดจะแตกต่างไปจากพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบในการทดสอบแรงดึง เนื่องจากตัวอย่างทดสอบที่อยู่ภายใต้แรงกดอัด จะมีการขยายตัวทางด้านข้าง ทำให้พื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น และ stress-strain curve จะมีความชันเพิ่มขึ้นแทนที่จะมีความชันลดลงดังเช่นที่เกิดขึ้นในการทดสอบแรงดึง ดังนั้น กำลังอัดประลัย (ultimate compressive strength) จะมีค่าเท่ากับกำลังอัดที่จุดแตกหัก (fracture compressive strength)

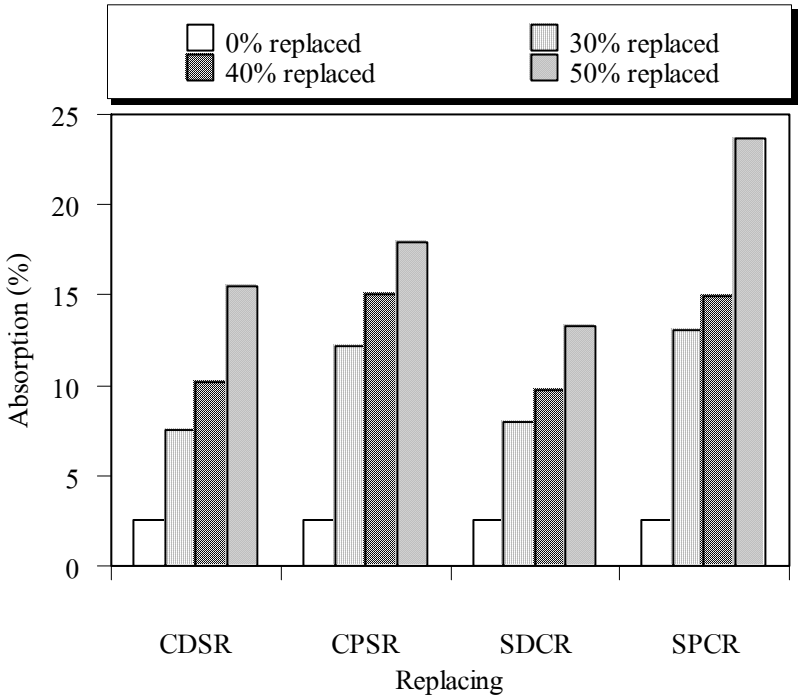
(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 4.25 ลักษณะการวิบัติของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์
(ก) แบบเฉือนหรือรูปกรวย
(ข) แบบผ่าซีกหรือแนวตรง
(ค) แบบระเบิด

ในกรณีที่วัสดุเปราะต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการวิบัติโดยใช้แรงเสียดทานภายในและแรงยึดเหนี่ยว (cohesion) ระหว่างอนุภาคในวัสดุนั้น มุมที่เกิดการวิบัติจะไม่ทำมุม 45° กับแนวราบ ตามที่สามารถพิสูจน์ได้โดยใช้ Mohr's circle แต่มุมดังกล่าวจะเป็น function กับมุมของความเสียดทานภายใน ระหว่างอนุภาคในวัสดุด้วย ตัวอย่างของวัสดุที่มีพฤติกรรมในลักษณะดังกล่าวคือ คอนกรีต โดยทั่วไปแล้ว ค่าของมุมที่เกิดการวิบัติของคอนกรีตจะอยู่ในช่วง 50° ถึง 60° สาเหตุที่คอนกรีตมีพฤติกรรมในลักษณะดังกล่าวเนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกันจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในเนื้อวัสดุ (nonhomogeneous material) ซึ่งทำให้รูปแบบของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุมีค่าเปลี่ยนไปจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในเนื้อวัสดุ อีกสาเหตุหนึ่งจะเกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหัวกดกับตัวอย่างทดสอบเนื่องจากการขยายตัวทางด้านข้าง ซึ่งแรงเสียดทานดังกล่าวจะทำให้สภาวะของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุเปลี่ยนไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งในตัวอย่างทดสอบที่สั้นมาก ๆ (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2543)

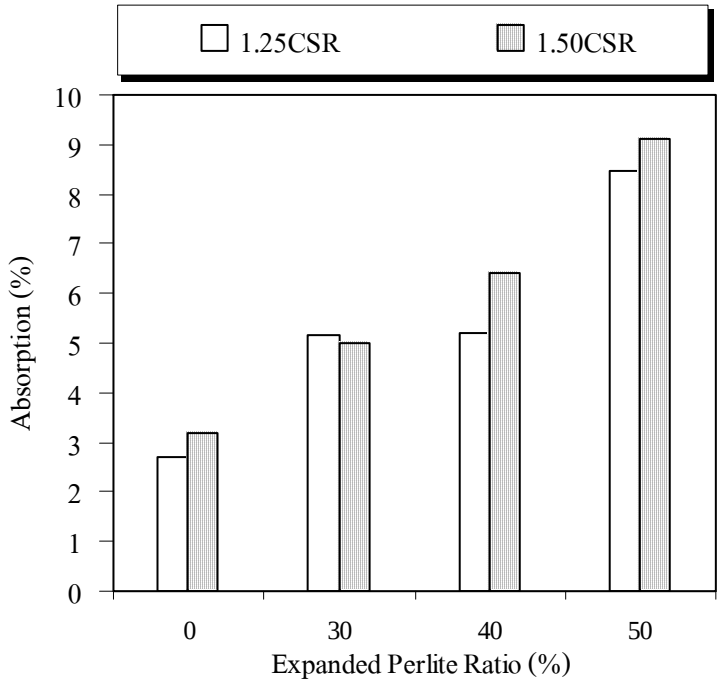
4.11 การดูดซึมน้ำ

จากผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์หรือทราย ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.26 พบว่าเมื่อปริมาณไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น การแทนที่ด้วยเพอร์ไลท์ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่าแทนที่ด้วยไดอะตอมไมท์ทั้งการแทนที่ปูนซีเมนต์หรือทราย เมื่อพิจารณาค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ แทนที่ทราย 30% มีค่าการดูดซึมน้ำน้อยที่สุด โดยมีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าคอนกรีตควบคุม 2.9 และ 4.7 เท่า และเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ที่การแทนที่เท่ากันมีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าคอนกรีตควบคุม 3.1 และ 5.0 เท่า และเมื่อใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์แทนที่ทราย 50% มีค่าการดูดซึมน้ำมากที่สุด โดยมีค่าการดูดซึมมากกว่าคอนกรีตควบคุม 6.0 และ7.0 เท่า และเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ที่การแทนที่เท่ากันมีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าคอนกรีตควบคุม 5.1 และ 9.2 เท่าตามลำดับ



รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์

จากผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาโดยการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.27 พบว่าเมื่อปริมาณเพอร์ไลท์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 30% มีค่าการดูดซึมน้ำน้อยที่สุด ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น 1.9 และ 1.6 เท่า และเมื่อใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 50% มีค่าการดูดซึมน้ำมากที่สุด มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น 3.2 และ 2.9 เท่าของคอนกรีตควบคุมที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ที่การแทนที่เท่ากัน พบว่าส่วนผสมที่เพิ่มปูนซีเมนต์ 50% มีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าการเพิ่มปูนซีเมนต์ 25% เนื่องจากส่วนผสมที่เพิ่มปูนซีเมนต์ 50% มีความข้นมากกว่า จึงทำให้การกระทุ้งเข้าแบบทำได้ยากกว่า จึงส่งผลให้มีโพรงอากาศเนื่องจากการอัดแน่น (entrapped air) ภายในเนื้อคอนกรีตมีมากกว่า



รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

4.12 การวิเคราะห์ราคา

จากการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบราคาพบว่าทุกการแทนที่ปูนซีเมนต์หรือทรายด้วยไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์ รวมทั้งคอนกรีตกลุ่มควบคุมเองมีราคาสูงมาก เนื่องจากในส่วนผสมดังกล่าวมีซิลิกาฟูมในส่วนผสม ซึ่งซิลิกาฟูมมีราคาแพงมาก และในคอนกรีต 1 m^3 จะใช้ซิลิกาฟูมประมาณ 40 ถึง 80 kg และไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์มีราคาแพงกว่าปูนซีเมนต์ประมาณ 2 ถึง 7 เท่า ซึ่งทำให้ราคาคอนกรีตมวลเบาที่ได้จากการทดสอบนี้มีราคาสูงกว่าคอนกรีตผสมเสร็จทั่วไปประมาณเท่าตัว ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และเมื่อพิจารณาหน่วยน้ำหนักพบว่าลดลงประมาณ 2.5 ถึง 29% แต่กำลังอัดลดลงประมาณ 35 ถึง 98% ซึ่งเห็นควรว่าคอนกรีตผสมเสร็จทั่วไปมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานจริงมากกว่าคอนกรีตมวลเบาที่ได้จากการทดสอบนี้ทั้งทางด้านกำลังอัดหน่วยน้ำหนัก และราคา

โดยราคาวัสดุเทียบกับราคากลางของเดือนธันวาคม 2551 ดังต่อไปนี้

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ราคา 2336 บาท/ตัน
- หินปูน ราคา 467 บาท/ลบ.ม.
- ทราย ราคา 336 บาท/ลบ.ม.
- ซิลิกาฟูม ราคา 28 บาท/กก.
- ไดอะตอมไมท์ ราคา 4 บาท/กก.
- เพอร์ไลท์ ราคา 14 บาท/กก.
- สารลดน้ำจำนวนมาก ราคา 120 บาท/ลิตร

ตารางที่ 4.8 ราคาของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์

	กำลังอัดประลัย (ksc)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)	บาท/ลบ.ม.
CSR	455	2267	4375
SD30CR	184	2176	3739
SD40CR	141	2060	3654
SD50CR	92	2075	3575
CD30SR	298	2211	4306
CD40SR	210	2055	3974
CD50SR	105	2014	3839
SP30CR	114	1848	4327
SP40CR	26	1817	4109
SP50CR	11	1618	3943
CP30SR	170	1980	4763
CP40SR	234	1832	4781
CP50SR	184	1741	4682

หมายเหตุ : มีซิลิกาฟูมในส่วนผสม

ตารางที่ 4.9 ราคาของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

	กำลังอัดประลัย (ksc)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)	บาท/ลบ.ม.
1.25CSR	857	2479	2617
1.50CSR	861	2458	2709
1.25CP30SR	549	2089	3686
1.25CP40SR	508	2051	3979
1.25CP50SR	411	1917	4000
1.50CP30SR	552	2121	3724
1.50CP40SR	478	2015	3992
1.50CP50SR	324	1783	3993

หมายเหตุ : ไม่มีซิลิกาฟูมในส่วนผสม

จากตารางที่ 4.9 พบว่าราคาคอนกรีตมวลเบาที่ได้จากการทดสอบมีราคาแพงกว่าคอนกรีตผสมเสร็จทั่วไปประมาณ 36 ถึง 48% และเมื่อพิจารณาหน่วยน้ำหนักพบว่าลดลงประมาณ 14 ถึง 27% แต่กำลังอัดลดลงประมาณ 36 ถึง 62% ซึ่งเมื่อเปรียบราคาที่เพิ่มขึ้นกับหน่วยน้ำหนักและกำลังที่ลดลงเห็นควรว่าคอนกรีตมวลเบาที่ได้จากการทดสอบนี้ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานจริงซึ่งคอนกรีตผสมเสร็จทั่วไปมีความเหมาะสมมากกว่าทั้งทางด้านกำลังอัด หน่วยน้ำหนัก และราคา

บทที่ 5
บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

เมื่อใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์เป็นวัสดุผสมในงานคอนกรีตโครงสร้างมวลเบาโดยการใช้แทนที่ปูนซีเมนต์หรือทรายโดยน้ำหนัก สามารถลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลงได้ คือ

1) ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ที่ 30 ถึง 50% หน่วยน้ำหนักลดลงจาก 2267 kg/m^3 เหลือ 2176 ถึง 2075 kg/m^3 แต่กำลังอัดลดลงจาก 455 ksc เหลือ 184 ถึง 92 ksc

2) ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ทรายที่ 30 ถึง 50% หน่วยน้ำหนักลดลงจาก 2267 kg/m^3 เหลือ 2211 ถึง 2014 kg/m^3 แต่กำลังอัดลดลงจาก 455 ksc เหลือ 298 ถึง 105 ksc

3) ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ที่ 30 ถึง 50% หน่วยน้ำหนักลดลงจาก 2267 kg/m^3 เหลือ 1848 ถึง 1618 kg/m^3 แต่กำลังอัดลดลงจาก 455 ksc เหลือ 114 ถึง 11 ksc

4) ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทรายที่ 30 ถึง 50% หน่วยน้ำหนักลดลงจาก 2267 kg/m^3 เหลือ 1980 ถึง 1741 kg/m^3 แต่กำลังอัดลดลงจาก 455 ksc เหลือ 234 ถึง 170 ksc

จากผลการวิจัยพบว่าไดอะตอมไมท์ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา เนื่องจากสามารถลดหน่วยน้ำหนักได้เพียงเล็กน้อย ส่วนเพอร์ไลท์สามารถลดลงหน่วยน้ำหนักได้ตามความคาดหวังแต่ให้กำลังอัดต่ำมากเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์

เมื่อให้คอนกรีตกลุ่มควบคุมมีปริมาณปูนซีเมนต์ 125% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทรายที่ 30 ถึง 50% จะได้หน่วยน้ำหนักลดลงจาก 2479 kg/m^3 เหลือ 2089 ถึง 1917 kg/m^3 แต่กำลังอัดลดลงจาก 857 ksc เหลือ 549 ถึง 411 ksc และทุก 10% ของการแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์จะทำให้มีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 13.1% เปรียบเทียบกับปริมาณน้ำของคอนกรีตกลุ่มควบคุมมีปริมาณปูนซีเมนต์ 125% และให้คอนกรีตกลุ่มควบคุมมีปริมาณปูนซีเมนต์ 150% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทรายที่ 30 ถึง 50% หน่วยน้ำหนักลดลงจาก 2458 kg/m^3 เหลือ 2121 ถึง 1783 kg/m^3 แต่กำลังอัดลดลงจาก 861 ksc เหลือ 552 ถึง 324 ksc และทุก 10% ของการแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์จะทำให้มีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 9.62% เปรียบเทียบกับปริมาณน้ำของคอนกรีตกลุ่มควบคุมมีปริมาณปูนซีเมนต์ 150%

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทรายในอัตราส่วนที่ละเอียดมากขึ้น เช่น 35%, 45% เพื่อให้การศึกษามีความละเอียดมากยิ่งขึ้น

2) ศึกษาเพิ่มเติมถึงคุณสมบัติการเป็นสารปอซโซลานของเพอร์ไลท์เมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น เช่น เมื่อคอนกรีตมีอายุ 60 วัน และ 90 วัน เป็นต้น

3) เนื่องจากเถ้าลอย (fly ash) มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานเช่นเดียวกับเพอร์ไลท์ มีความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 1.8 ถึง 2.8 สำหรับงานวิจัยในอนาคตควรมีการศึกษาถึงการนำเถ้าลอยมาใช้ร่วมกับเพอร์ไลท์ในส่วนผสมคอนกรีต หรือออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีกำลังอัดต่ำลงอยู่ที่ประมาณ 180 ถึง 240 ksc เพื่อลดราคาลดต้นทุนในการผลิตเนื่องจากเถ้าลอยมีราคาถูกเมื่อเทียบกับเพอร์ไลท์ แต่ทั้งควรคำนึงถึงการนำไปใช้งานด้วย

4) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้น การนำข้อมูลและผลการทดลองในงานวิจัยนี้ไปใช้ควรมีการควบคุมคุณภาพของวัสดุ เช่น ไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ มวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด และอุปกรณ์การทดสอบทุกชนิด ตลอดจนขั้นตอนในการปฏิบัติเพื่อให้ได้ผลใกล้เคียงกับผลการวิจัย

รายการอ้างอิง

คม บัวคลี่ และรังสรรค์ รังสิมาวงศ์ (2540). **การพัฒนามอร์ต้าร์มวลเบาโดยการใช้เพอร์ไลท์**. เอกสารงานวิจัย. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จิตรกร ดังอนุสรณ์สุข และคณะ (2548). **ผลกระทบของเพอร์ไลท์ต่อการซึมผ่านอากาศและปริมาณช่องว่างอากาศภายในซีเมนต์มอร์ต้าร์**. ปริญญานิพนธ์. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ชัชวาล เศรษฐบุตร. (2540). **คอนกรีตเทคโนโลยี.** พิมพ์ครั้งที่ 4. บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด. กรุงเทพ ฯ.

ณรงค์ศักดิ์ นันทคำภิรา และคณะ. (2547). **หินอัคนี**.[ออนไลน์]. ได้จาก: http://www.soil.civil.rmut.ac.th /rock/index1.html.

บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด. (2548). **ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ. ปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม

ประพัตร์ กรังพานิชย์. (2540). **การนำกากแร่สังกะสีและวัสดุพรุนเบาเพอร์ไลท์มาผลิตเป็นคอนกรีตเบา**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัยจาตุรพิทักษ์กุล. (2547). **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต**. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย.

วินิต ช่อวิเชียร. (2544). **คอนกรีตเทคโนโลยี.** พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ.

ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี. (2550). **การใช้เพอร์ไลท์ในงานคอนกรีตมวลเบา.** การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3. สมาคมคอนกรีตไทย. p. MAT 23.

สิทธิชัย แสงอาทิตย์. (2543). **เอกสารประกอบการสอนวิชา 410 214 Material Testing.** สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน กลุ่มวิศวกรรมและความปลอดภัย. (2546). **เพอร์ไลท์**.[ออนไลน์]. ได้จาก: http://www.dpim.go.th/ppr/title.php?tid=000001074149948.

American Concrete Institute. (2000). **Use of Fly Ash in Concrete**. ACI Manual of Concrete Practice. Part 1. Michigan. (ACI 232.2R-96)

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 Cylindrical Concrete Specimens**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 39/C 39M-99).

American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 642-97).

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 138M-01a).

American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.01. (ASTM C 188-95).

American Society for Testing and Materials. (2001). **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. (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 Slump of Hydraulic-Cement Concrete**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 143/C143M-98).

American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 127-88).

American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 469-94).

American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 403/C 403M-99).

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 29M-97a).

Aydin A.C. and Gul R. (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.

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.

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.

Fragoulisa D., Stamatakisb M.G., Chaniotakisa E. and Columbusb G. (2004). **Characterization of Lightweight Aggregates Produced with Diatomite Rocks Originating From Greece**. Materials Characterization. 53. p.307-316.

Pimraksa K. and Chindaprasirt P. (2008). **Lightweight Bricks Made of Diatomaceous Earth, Lime and Gypsum**. Ceramics International. CERI-2954; No of Pages 8.

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.

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของ ไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

Analyte	Concentration		
	Diatomite	Perlite	
SiO_2	59.313	73.677	Wt %
Al_2O_3	9.990	9.177	Wt %
Fe_2O_3	18.499	2.747	Wt %
K_2O	1.918	9.992	Wt %
CaO	1.213	1.724	Wt %
TiO_2	0.573	0.501	Wt %
Loss on Ignition (LOI)	8.11	1.02	Wt %

ตารางที่ ก.2 ค่าความถ่วงจำเพาะของไดอะตอมไมท์

Temperature	(t)	°C	30
Density of Water	(d_t)	g/ml	0.9957
Wt. Dry Sample (A)		g	50.3
Initial Volume	(V_0)	g	0.70
Final Volume	(V_1)	g	22.3
Apparent Specific Gravity			
$G_{A(t/t\ °C)} = A / (V_1 - V_0)$			2.329
$G_{A(4/4\ °C)} = d_t.G_{A(t/t\ °C)}/1.00$			2.319
$G_{A(23/23\ °C)} = d_t.G_{A(t/t\ °C)}/0.9975$			2.325

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 ค่าความถ่วงจำเพาะของเพอร์ไลท์

Temperature	(t)	°C	30
Density of Water	(d_t)	g/ml	0.9957
Wt. Dry Sample (A)		g	50.0
Wt. Pycnometer + Water + Sample	(W_1)	g	1406.6
Wt. Pycnometer + Water	(W_2)	g	1445.8
Apparent Specific Gravity			
$G_{A(t/t\ °C)} = A / (A + W_2 - W_1)$			0.561
$G_{A(4/4\ °C)} = d_t.G_{A(t/t\ °C)}/1.00$			0.559
$G_{A(23/23\ °C)} = d_t.G_{A(t/t\ °C)}/0.9975$			0.560

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 ผลการวิเคราะห์ Lazer Particle Size ของไดอะตอมไมท์

ID: Diatomite	Run No: 5	Measured: 11/2/109 14:48PM
File: SAME	Rec. No: 62	Analysed: 11/2/109 14:48PM
Path: D:\METHAWEE 25-12-08		Source: Analysed

Range : 300RF mm	Beam: 2.40 mm	Sampler: MS17	Obs': 17.1 %
Presentation: 3OHD	Analysis: Polydisperse		Residual: 0.591 %
Modifications: None			

Conc. = 0.0083 %Vol	Density = 1.000 g/cm^3	S.S.A.= 3.0211 m^2/g
Distribution: Volume	D[4, 3] = 7.98 μm	D[3, 2] = 1.99 μm
D(v, 0.1) = 0.90 μm	D(v, 0.5) = 5.82 μm	D(v, 0.9) = 17.56 μm
Span = 2.862E+00	Uniformity = 9.116E-01	

Size (μm)	Volume Under%	Size (μm)	Volume Under%	Size (μm)	Volume Under%	Size (μm)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	8.39	9.00	66.81	120.67	100.00
0.06	0.00	0.78	9.18	10.48	72.94	140.58	100.00
0.07	0.01	0.91	10.09	12.21	78.76	163.77	100.00
0.08	0.02	1.06	11.17	14.22	84.02	190.80	100.00
0.09	0.04	1.24	12.50	16.57	88.52	222.28	100.00
0.11	0.08	1.44	14.17	19.31	92.14	258.95	100.00
0.13	0.17	1.68	16.25	22.49	94.87	301.68	100.00
0.15	0.33	1.95	18.80	26.20	96.81	351.46	100.00
0.17	0.61	2.28	21.85	30.53	98.11	409.45	100.00
0.20	1.05	2.65	25.40	35.56	98.95	477.01	100.00
0.23	1.70	3.09	29.40	41.43	99.48	555.71	100.00
0.27	2.57	3.60	33.80	48.27	99.83	647.41	100.00
0.31	3.60	4.19	38.58	56.23	100.00	754.23	100.00
0.36	4.67	4.88	43.71	65.51	100.00	878.67	100.00
0.42	5.71	5.69	49.14	76.32	100.00		
0.49	6.68	6.63	54.85	88.91	100.00		
0.58	7.58	7.72	60.77	103.58	100.00		

ตารางที่ ก.5 ผลการวิเคราะห์ Lazer Particle Size ของเพอร์ไลท์

ID: Perlite	Run No: 8	Measured: 11/2/109 14:53PM
File: SAME	Rec. No: 65	Analysed: 11/2/109 14:53PM
Path: D:\METHAWEE 25-12-08		Source: Analysed

Range : 300RF mm	Beam: 2.40 mm	Sampler: MS17	Obs': 14.4 %
Presentation: 3OHD	Analysis: Polydisperse		Residual: 0.572 %
Modifications: None			

Conc. = 0.0543 %Vol	Density = 1.000 g/cm^3	S.S.A.= 0.4323 m^2/g
Distribution: Volume	D[4, 3] = 109.97 μm	D[3, 2] = 13.88 μm
D(v, 0.1) = 17.15 μm	D(v, 0.5) = 77.80 μm	D(v, 0.9)=256.56 μm
Span = 3.077E+00	Uniformity = 9.176E-01	

Size	Volume	Size	Volume	Size	Volume	Size	Volume
(μm)	Under%	(μm)	Under%	(μm)	Under%	(μm)	Under%
0.05	0.00	0.67	1.12	9.00	5.20	120.67	66.43
0.06	0.00	0.78	1.17	10.48	6.06	140.58	71.64
0.07	0.00	0.91	1.23	12.21	7.07	163.77	76.60
0.08	0.01	1.06	1.28	14.22	8.25	190.80	81.38
0.09	0.01	1.24	1.35	16.57	9.65	222.28	85.97
0.11	0.03	1.44	1.42	19.31	11.33	258.95	90.25
0.13	0.05	1.68	1.51	22.49	13.38	301.68	94.02
0.15	0.09	1.95	1.62	26.20	15.89	351.46	97.02
0.17	0.14	2.28	1.75	30.53	18.97	409.45	99.01
0.20	0.22	2.65	1.90	35.56	22.67	477.01	100.00
0.23	0.33	3.09	2.08	41.43	27.02	555.71	100.00
0.27	0.46	3.60	2.30	48.27	32.00	647.41	100.00
0.31	0.60	4.19	2.58	56.23	37.47	754.23	100.00
0.36	0.74	4.88	2.92	65.51	43.29	878.67	100.00
0.42	0.86	5.69	3.33	76.32	49.25		
0.49	0.97	6.63	3.85	88.91	55.17		
0.58	1.06	7.72	4.46	103.58	60.93		

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

ตารางที่ ข.1 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์

	กำลังอัดประลัย (ksc)			
	อายุการบ่ม (days)			
	1	7	28	60
CSR	225	455	455	489
SD30CR	49	148	184	208
SD40CR	26	98	141	160
SD50CR	17	46	92	123
CD30SR	135	203	298	326
CD40SR	40	86	210	217
CD50SR	23	82	105	127
SP30CR	0	76	114	120
SP40CR	0	17	26	34
SP50CR	0	6	11	15
CP30SR	94	170	170	181
CP40SR	66	137	234	235
CP50SR	52	100	184	198

ตารางที่ ข.2 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

	กำลังอัดประลัย (ksc)			
	อายุการบ่ม (days)			
	1	7	14	28
1.25CSR	678	838	851	857
1.50CSR	693	843	855	861
1.25CP30SR	331	462	474	549
1.25CP40SR	324	442	473	508
1.25CP50SR	227	325	372	411
1.50CP30SR	366	486	531	552
1.50CP40SR	281	409	412	478
1.50CP50SR	188	272	298	324

ตารางที่ ข.3 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์

	หน่วยน้ำหนักแห้ง (kg/m^3)			
	อายุการบ่ม (days)			
	1	7	28	60
CSR	2418	2343	2267	2102
SD30CR	2135	2216	2176	2176
SD40CR	2095	2124	2060	2124
SD50CR	2051	2055	2075	2049
CD30SR	2175	2285	2211	2201
CD40SR	2025	2054	2055	2050
CD50SR	1940	2051	2014	1978
SP30CR	1784	1834	1848	1867
SP40CR	1665	1739	1817	1779
SP50CR	1516	1565	1618	1629
CP30SR	1931	1979	1980	1924
CP40SR	1807	1819	1832	1779
CP50SR	1698	1735	1741	1708

ตารางที่ ข.4 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

	หน่วยน้ำหนักสด (kg/m^3)	หน่วยน้ำหนักแห้ง (kg/m^3)			
		อายุการบ่ม (days)			
		1	7	14	28
1.25CSR	2523	2429	2459	2467	2479
1.50CSR	2504	2435	2451	2437	2458
1.25CP30SR	2150	2099	2111	2098	2089
1.25CP40SR	2069	2020	2070	2055	2051
1.25CP50SR	1932	1919	1914	1927	1917
1.50CP30SR	2159	2118	2126	2126	2121
1.50CP40SR	2014	1911	2007	1986	2015
1.50CP50SR	1831	1758	1792	1775	1783

ตารางที่ ข.5 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์

.	This study (ksc)	ACI 318 (Normal Concrete) (ksc)	ACI 318 (ksc)
CSR	292385	322094	287822
SD30CR	249011	204826	185920
SD40CR	177992	179303	149913
SD50CR	150270	144834	122419
CD30SR	279518	260666	242337
CD40SR	193142	218820	182287
CD50SR	131095	154729	125058
SP30CR	133591	161224	114534
SP40CR	38726	76995	53327
SP50CR	15422	50081	29147
CP30SR	208061	196880	155114
CP40SR	164774	230986	161966
CP50SR	133523	204826	133056

ตารางที่ ข.6 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ 25 และ 50% และใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย

	This study (ksc)	ACI 318 (Normal Concrete) (ksc)	ACI 318 (ksc)
1.25CSR	467452	442046	481716
1.50CSR	466843	443076	489040
1.25CP30SR	306286	353804	302080
1.25CP40SR	275074	340337	282689
1.25CP50SR	224824	306124	229764
1.50CP30SR	294303	354770	309891
1.50CP40SR	247212	330134	267027
1.50CP50SR	178988	271800	182990

ภาคผนวก ค

รูปเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

รูปที่ ค.1 เครื่อง Laser Particle Size Analyzer

รูปที่ ค.2 เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

รูปที่ ค.3 เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)

รูปที่ ค.4 เครื่อง Thermo Gravimetric Analyzer (TGA)

รูปที่ ค.5 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

รูปที่ ค.6 เครื่อง Transmission Electron Microscope (TEM)

ภาคผนวก ง

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 13-15 พฤษภาคม 2552

การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตโครงสร้างมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์เป็นวัสดุปอซโซลานและมวลรวมละเอียด

A PRELIMINARY STUDY ON PROPERTIES OF STRUCTURAL LIGHTWEIGHT CONCRETE USING DIATOMITE AND PERLITE AS POZZOLAN AND FINE AGGREGATE

เมธาวี ศรีวัฒนพงศ์ (Methawee Sriwattanapong)[1]

ธีรวัฒน์ สินศิริ (Theerawat Sinsiri)[2]

ปริญญา จินดาประเสริฐ (Prinya Chindaprasirt)[3]

[1]นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี sutcivil@hotmail.com

[2]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี sinsiri@g.sut.ac.th

[3]ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น prinya@kku.ac.th

บทคัดย่อ : คอนกรีตทั่วไปมีหน่วยน้ำหนักค่อนข้างมากประมาณ 2,200 ถึง 2,600 kg/m^3 จึงทำให้ขนาดของโครงสร้างอาคารคอนกรีตมีขนาดใหญ่ วิธีการหนึ่งที่จะลดขนาดของโครงสร้างลงได้ คือ การทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักลดลง จึงมีแนวความคิดที่จะนำเอาไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ ซึ่งเป็นสารปอซโซลานธรรมชาติที่มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ และความพรุนสูง มาปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตโครงสร้างให้มีน้ำหนักลดลง โดยการแทนที่ทรายและปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตในอัตราส่วนร้อยละ 0, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักไม่เกิน 2,000 kg/m^3 และมีกำลังอัดที่เหมาะสมสามารถนำไปใช้ในงานคอนกรีตโครงสร้างได้จริง ซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ส่งเสริมการประหยัดพลังงานโดยลดการใช้ปูนซีเมนต์และสามารถลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ก่อให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อน

ABSTRACT : Normal concrete has a heavy weight of around 2,200 and up to 2,600 kg/m^3 which causes the longer size of structural members. One method to decrease the size of the structural concrete members is to reduce the concretes weight. The main idea of this study is to use lightweight natural pozzolan such as diatomite and perlite in decreasing the weight of concrete by replacement of sand and cement in ratios of 0, 30, 40, and 50 percent by weight. The target of weight of the concrete should not to be exceed 2,000 kg/m^3. This type of concrete can be the effectively applied to real work , reducing the expenses in construction cost, save energy by decreasing the use of large amount of cement and decreasing quantity of carbon dioxide that causes the global warming effect.

KEYWORDS : Diatomite, Perlite, Pozzolan, Structural Lightweight Concrete

1. บทนำ

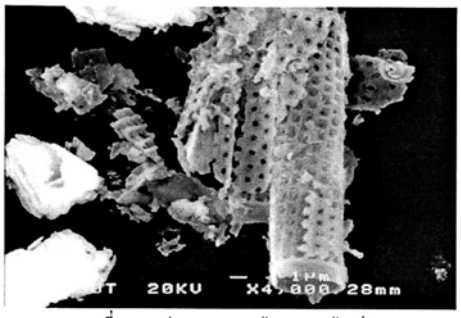
1.1 ความสำคัญของปัญหา

คอนกรีตทั่วไปมีหน่วยน้ำหนักประมาณ 2,200 ถึง 2,600 kg/m^3 [1] หน่วยน้ำหนักที่ค่อนข้างมากเช่นนี้ทำให้ต้องออกแบบโครงสร้างให้มีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะรองรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (dead load) โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาคารสูง วิธีการหนึ่งที่จะลดขนาดของโครงสร้างลงได้คือการทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักลดลง ซึ่งปัจจุบันมีการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตเพื่อให้มีหน่วยน้ำหนักน้อยลงและมีคุณสมบัติเหมาะสมสามารถใช้งานได้ทุกสภาพการใช้งานทั้งคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เช่น ความสามารถในการลำเลียง ความสามารถในการเทได้ และกำลังอัด เป็นต้น จากงานวิจัยในอดีตได้มีการนำวัสดุผสมเพิ่มในกลุ่มสารปอซโซลาน (pozzolan) ทั้งในกลุ่มที่ได้จากขบวนการผลิต (artificial pozzolan) เช่น เถ้าลอย (fly ash) เถ้าแกลบ (rice husk ash) เถ้าก้นเตา (bottom ash) ตะกรันจากเตาถลุง (blast furnace slag) และซิลิกาฟูม (silica fume) และกลุ่มสารปอซโซลานธรรมชาติ (natural pozzolan) เช่น ดินขาวเผา (metakaolin) ไดอะตอมไมท์ (diatomite) และเพอร์ไลท์ (perlite) มาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต เช่น ลดน้ำหนักคอนกรีต ลดปฏิกิริยาอัลคาไล ลดปัญหาการเยิ้ม ลดการแยกตัว ลดการซึมผ่าน เพิ่มความทนทาน และเพิ่มกำลัง เป็นต้น

ในประเทศไทยยังมีการศึกษาวิจัยเรื่องการนำไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ มาใช้ในงานคอนกรีตค่อนข้างน้อย จึงมีแนวความคิดที่จะนำเอาไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ ที่มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ ความพรุนสูง มาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านการลดน้ำหนัก

1.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไดอะตอมไมท์คือชื่อเรียกทางวิทยาแร่ของดินเบา (diatomaceous earth) หรือดินไดอะตอม คือ ดิน ซึ่งเกิดจากการทับถมของซากไดอะตอม ซึ่งเป็นพืชเซลล์เดียวขนาดเล็กมาก ตั้งแต่ 2 ถึง 2,000 ไมครอน มีผนังเป็นฝาซิลิกาประกบกัน ไดอะตอมพบได้ใน แหล่งน้ำทั่วโลกทั้งน้ำจืด น้ำกร่อยและน้ำเค็ม มีอยู่ประมาณ 12,000 ถึง 16,000 ชนิด บางชนิดว่ายน้ำได้ แต่บางชนิดต้องอาศัยกระแสน้ำพัดพาไป เมื่อตายลงเปลือกที่เป็นซิลิกาจะตกตะกอนทับถมกันเป็นจำนวนมากจนเกิดเป็นแหล่งไดอะตอม ลักษณะของไดอะตอมไมท์ ดังแสดงในภาพที่ 1

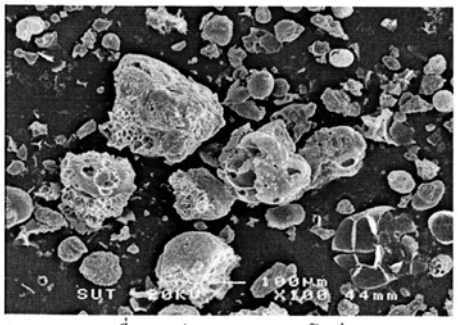


ภาพที่ 1 ภาพถ่าย SEM ของไดอะตอมไมท์ [2]

จากภาพถ่าย SEM ของไดอะตอมไมท์ ของ Pantawee และ Sinsiri [2] จะเห็นอนุภาคที่มีลักษณะทรงกระบอก ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) ประมาณ 32 μm มีโครงสร้างผนังเป็นตารางคล้ายรวงผึ้ง ขนาดของช่องประมาณ 1 μm มีพื้นที่ผิวที่สูงถึง 17,000 m^2/kg ซึ่งทำให้ไดอะตอมไมท์มีน้ำหนักเบาและมีความพรุนสูง

Pimraksa และ Chindaprasirt [3] ได้ศึกษาคุณสมบัติของไดอะตอมไมท์จากแหล่งลำปาง พบว่าไดอะตอมไมท์จากแหล่งลำปางมีคุณสมบัติในการเป็นสารปอซโซลาน เนื่องจากมีซิลิกาและอลูมินาสูง มีความพรุนสูง เช่นเดียวกับสารปอซโซลานธรรมชาติทั่วไป และพบว่าปริมาณออกไซด์หลัก SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มีค่า 77.5, 14.6 และ 5.24% ตามลำดับ ซึ่งกล่าวได้ว่าไดอะตอมไมท์นี้จัดเป็นปอซโซลานธรรมชาติ Class N ตามการจำแนกตามมาตรฐาน ASTM C 618

หินเพอร์ไลท์ หมายถึง หินภูเขาไฟเนื้อแก้วและรวมทั้งสิ่งที่เกิดจากการขยายตัวของหินภูเขาไฟเนื้อแก้วเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมในเวลาที่ไม่นานนักจะขยายตัวตั้งแต่ 4-20 เท่าของปริมาตรเดิม ทำให้เปลี่ยนสภาพเป็นสารที่มีน้ำหนักเบา มีความพรุนสูงและมีลักษณะคล้ายหินพูมิซ สารที่ได้จากการขยายตัวของหินภูเขาไฟเนื้อแก้วนี้ เรียกว่า เพอร์ไลท์ ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ภาพถ่าย SEM ของเพอร์ไลท์ [2]

ประพัตร์ กรังพานิชย์ [4] ได้ศึกษาถึงการนำกากแร่สังกะสีและเพอร์ไลท์มาผลิตเป็นคอนกรีตมวลเบา โดยนำกากแร่สังกะสีและเพอร์ไลท์เป็นวัสดุผสมแทนทรายเพื่อลดน้ำหนักของคอนกรีต และได้ทำการศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติของเพอร์ไลท์ในด้านต่าง ๆ เช่น ศึกษาองค์ประกอบหลักทางเคมีของเพอร์ไลท์ โดยใช้วิธี X–Ray Fluorescence ซึ่งพบว่าองค์ประกอบหลักของเพอร์ไลท์ที่พบปริมาณสูง ได้แก่ SiO_2 ซึ่งพบในปริมาณร้อยละ 70.29 ส่วน Al_2O_3 และ K_2O พบในปริมาณร้อยละ 13.64 และ 5.73 ตามลำดับ ส่วนองค์ประกอบรอง (trace element) พบในปริมาณไม่มากนัก ได้แก่ P_2O_2, MgO และ CaO

Pantawee และ Sinsiri [2] ได้ทำการศึกษาการใช้เพอร์ไลท์ชนิดละเอียดในการเป็นวัสดุปอซโซลาน พบว่าเพอร์ไลท์ มีลักษณะไม่เป็นผลึก หรือมีรูปร่างอสัณฐาน เมื่อนำเพอร์ไลท์ผสมเพิ่ม 10% ทำให้ค่ากำลังอัดลดลง 17.92 และมีค่าเพิ่มสูงขึ้น 8.04 และ 15.89% ที่อายุการบ่ม 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ และได้แนะนำปริมาณในการใช้เพอร์ไลท์เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยการผสมเพิ่ม 5 ถึง 15% คือค่าที่เหมาะสมที่สามารถทำให้กำลังอัดสูงสุด โดยมีค่า Strength Activity Index ที่อายุการบ่ม 28 วัน อยู่ในเกณฑ์กำหนด

2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อเป็นการทดลองหาสัดส่วนผสมคอนกรีตโครงสร้างโดยใช้ไดอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลท์เป็นส่วนผสม ให้ได้คอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักไม่เกิน 2,000 kg/m^3 และมีกำลังอัดที่สามารถประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างจริงได้

3. ขอบเขตของการศึกษา

1) คอนกรีตควบคุมที่ใช้จะออกแบบส่วนผสมตามวิธีของสถาบันคอนกรีตอเมริกัน (ACI) ให้มีกำลังอัด 450 ksc และค่าการยุบตัว 8-10 เซนติเมตร

2) ปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมคอนกรีตเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ตรานกอินทรีย์)

3) มวลรวมละเอียดที่ใช้ผสมคอนกรีต ใช้ทรายแม่น้ำ

4) มวลรวมหยาบที่ใช้ผสมคอนกรีต ใช้หินปูนขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว

5) น้ำที่ใช้ผสมและบ่มคอนกรีตใช้น้ำประปา

6) สารผสมเพิ่มใช้สารลดน้ำจำนวนมาก (superplasticizer)

7) ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

8) การผสมไดอะตอมไมท์ และเพอร์ไลท์ ลงในคอนกรีตทำโดยการแทนที่ทรายและปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 1 เพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตเมื่อใช้ ไดอะตอมไมท์ และเพอร์ไลท์ เป็นส่วนผสมมีหน่วยน้ำหนักต่ำกว่า 2,000 kg/m^3 และมีกำลังอัดเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งาน

ตารางที่ 1 แสดงสัญลักษณ์ของแต่ละสัดส่วนผสม

Control Conc.	CSR
แทนที่ซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลท์ 30%	SP30CR
แทนที่ซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลท์ 40%	SP40CR
แทนที่ซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลท์ 50%	SP50CR
แทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 30%	CP30SR
แทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 40%	CP40SR
แทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 50%	CP50SR
แทนที่ซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์ 30%	SD30CR
แทนที่ซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์ 40%	SD40CR
แทนที่ซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์ 50%	SD50CR
แทนที่ทรายด้วยไดอะตอมไมท์ 30%	CD30SR
แทนที่ทรายด้วยไดอะตอมไมท์ 40%	CD40SR
แทนที่ทรายด้วยไดอะตอมไมท์ 50%	CD50SR

9) ใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm ตัวอย่างจะถูกถอดออกจากแบบเมื่ออายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำ และทดสอบที่อายุ 1, 7, 28 และ 60 วัน ทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 ทดสอบหาหน่วยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C642

4. ผลการศึกษา

4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์กับปูนซีเมนต์และทราย ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าไดอะตอมไมท์ และเพอร์ไลท์ มีความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักต่ำกว่าปูนซีเมนต์ และทราย โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.74 และ 0.18 เท่าของปูนซีเมนต์ และประมาณ 0.89และ 0.21 เท่าของทราย ตามลำดับ ไดอะตอมไมท์มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย Median Particle Size (d_{50}) เล็กกว่าปูนซีเมนต์ ประมาณ 0.36 เท่า ส่วนเพอร์ไลท์มีขนาดอนุภาค d_{50}

ใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ ประมาณ 4.80 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการลดน้ำหนักของคอนกรีตลงได้ เนื่องจากมีขนาดที่ใหญ่กว่าแต่มีความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่า มีน้ำหนักเบาและมีความพรุนสูง

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์ ไดอะตอมไมท์ และเพอร์ไลท์

	Cement Type 1	Diatomite	Expanded Perlite
Specific Gravity	3.15	2.34	0.56
Dry Unit Weight (kg/m^3)	1,450	537-769	168-205
Median Particle Size (μm)	16.20	5.82	77.80

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ไดอะตอมไมท์ และเพอร์ไลท์ มีปริมาณสารประกอบหลัก $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ ใกล้เคียงกัน ซึ่งจัดเป็นวัสดุปอซโซลานได้ทั้ง Class N ตามระบุในมาตรฐาน ASTM C618 (2001) ซึ่งกำหนดให้ปริมาณสารประกอบหลักดังกล่าวต้องมีค่ามากกว่า 70% และมีค่า LOI ไม่มากกว่า 10 และค่า SO_3 ไม่มากกว่า 4% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ ไดอะตอมไมท์ และเพอร์ไลท์

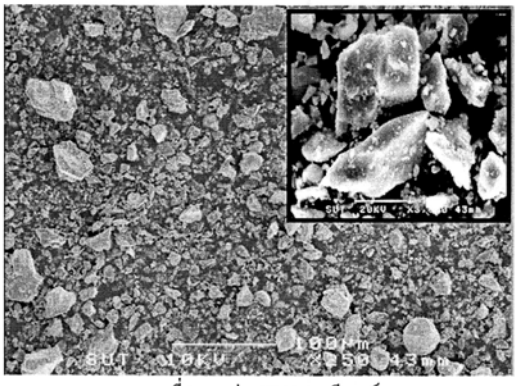
Chemical Composition (%)	Cement Type 1	Diatomite	Expanded Perlite
SiO_2	18.085	59.313	73.677
Al_2O_3	3.510	9.990	9.177
Fe_2O_3	3.047	18.499	2.747
CaO	67.457	1.213	1.724
K_2O	0.630	1.918	9.992
TiO_2	0.232	0.573	0.501
SO_3	3.299	159 ppm	158 ppm
Loss on Ignition (LOI)	3.15	8.11	1.02

4.3 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาค

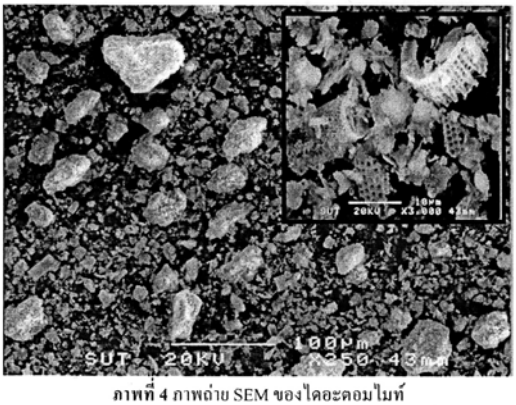
จากภาพถ่าย Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าไดอะตอมไมท์ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเผาหรือบด จะมีลักษณะอนุภาคเป็นแท่งทรงกระบอกกลวง มีผนังลักษณะเป็นโครงข่ายที่ค่อนข้างสมบูรณ์และเป็นระเบียบคล้ายรวงผึ้ง มีความพรุนสูง ขนาดอนุภาคประมาณ 5 ถึง 25 micron ดังแสดงในภาพที่ 4

ส่วนเพอร์ไลท์มีขนาดอนุภาคประมาณ 60 ถึง 300 micron จากภาพถ่าย SEM แสดงให้เห็นถึงลักษณะของเพอร์ไลท์ คือ มีลักษณะอนุภาคแบบกลวง เปราะ มีลักษณะเป็นโครงข่าย บางอนุภาคมีลักษณะคล้ายเปลือกไข่ และมีความพรุนสูงเนื่องจากผ่านกระบวนการเผาเพื่อให้เกิดการขยายตัว

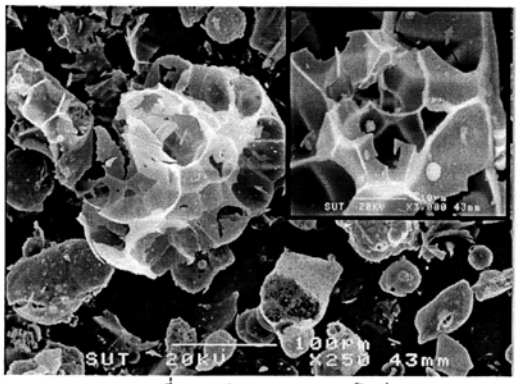
อนุภาคของปูนซีเมนต์มีลักษณะอนุภาคแบบมีเหลี่ยมคม มีความหนาแน่นสูง ดังแสดงในภาพที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะอนุภาคของ Natural Pozzolan ทั้งสองชนิด แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตจะสามารถทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักที่ลงเบาได้ แต่เนื่องจากสารปอซโซลานทั้งสองชนิดมีความพรุนสูงจะทำให้มีความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น จึงส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตด้วย



ภาพที่ 3 ภาพถ่าย SEM ของซีเมนต์



ภาพที่ 4 ภาพถ่าย SEM ของไดอะตอมไมท์

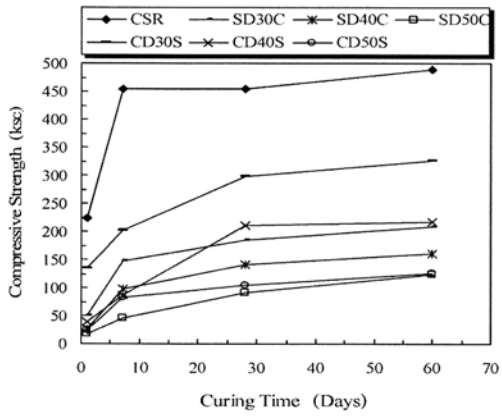


ภาพที่ 5 ภาพถ่าย SEM ของเพอร์ไลท์

4.4 กำลังอัด (compressive strength)

4.4.1 การแทนที่ด้วยไดอะตอมไมท์

จากภาพที่ 6 พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตโครงสร้างมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มโดยการแทนที่ทรายที่อายุการบ่ม 1 และ 7 วัน มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ทรายที่เพิ่มขึ้น ค่ากำลังอัดของคอนกรีตโครงสร้างมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ทราย 30% มีค่าสูงที่สุด 298 และ 326 ksc ซึ่งมีค่าลดลง34.51 และ 33.33% และเมื่อใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ทราย 50% มีค่าน้อยที่สุด 105 และ 127 ksc ซึ่งมีค่าลดลง 76.92 และ 74.03% ของคอนกรีตควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 และ 60 วัน ตามลำดับ และการพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับคอนกรีตควบคุม



ภาพที่ 6 กำลังอัดของคอนกรีตโครงสร้างมวลเบาผสมไดอะตอมไมท์

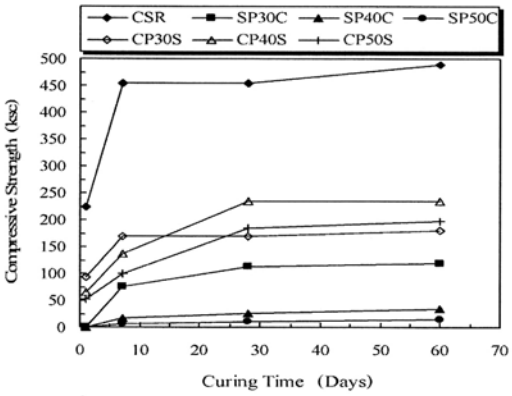
ค่ากำลังอัดของคอนกรีตโครงสร้างมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ค่ากำลังอัดของคอนกรีตโครงสร้างมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 30% มีค่าสูงที่สุด 184 และ 217 ksc ซึ่งมีค่าลดลง 59.56 และ 55.62% และเมื่อใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 50% มีค่าน้อยที่สุด 92 และ 123 ksc ซึ่งมีค่าลดลง 79.78 และ 74.85% ของคอนกรีตควบคุมที่อายุการบ่ม 28 และ 60 วัน ตามลำดับ และการพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับคอนกรีตควบคุม

4.4.2 การแทนที่ด้วยเพอร์ไลท์

จากภาพที่ 7 พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เพอร์ไลท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม โดยการแทนที่ทรายมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ทรายที่เพิ่มขึ้น ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 40% ที่อายุการบ่ม 28 และ 60 วัน มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่ากำลังอัดสูงที่สุด 234 และ 235 ksc ซึ่งมีค่าลดลง 48.57 และ 51.94% ตามลำดับ แต่ที่การแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 30% หลังจากอายุ 7 วัน มีการพัฒนากำลังอัดน้อยมาก และมีค่ากำลังอัดต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 40 และ 50% โดยมีค่ากำลังอัดประมาณ 170, 170 และ 181 ksc ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม 62.64, 62.64 และ 62.99% ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 60 วัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 30% นี้ มีการพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกที่ค่อนข้างรวดเร็ว แต่การพัฒนากำลังอัดภายหลังอายุ 7 วัน มีค่าน้อยมาก ซึ่งคล้ายกับคอนกรีตควบคุม ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณซิลิกาฟูมที่ค่อนข้างสูง จึงทำให้การพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกสูง

ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เพอร์ไลท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับคอนกรีตควบคุม ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เพอร์ไลท์ แทนที่ปูนซีเมนต์ 30% มีค่ากำลังอัดสูงที่สุด 114 และ 120 ksc มีค่าลดลง 74.95 และ 75.46% และเมื่อใช้เพอร์ไลท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 50% มีค่ากำลังอัดน้อยที่สุด 11 และ 15 ksc มีค่าลดลง 97.58 และ 96.93% ของคอนกรีตควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 และ 60 วัน

ตามลำดับ ซึ่งเป็นสาเหตุเนื่องมาจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลท์ในปริมาณที่มากเกินไป



ภาพที่ 7 กำลังอัดของคอนกรีตโครงสร้างมวลเบาผสมเพอร์ไลท์

4.5 หน่วยน้ำหนัก (unit weight)

จากตารางที่ 4 พบว่า ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบา ที่อายุ 28 วัน ที่ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ในส่วนผสมทั้งโดยการแทนที่ทรายและปูนซีเมนต์มีค่าต่ำกว่าการใช้ไดอะตอมไมท์ เนื่องจากเพอร์ไลท์มีความพรุนมากกว่า และมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าไดอะตอมไมท์ ค่าหน่วยน้ำหนักที่มีค่าต่ำสุดที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลท์ 50% มีค่าหน่วยน้ำหนัก 1741 kg/m^3 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่แทนที่ทรายด้วยไดอะตอมไมท์ 13.56% ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่เท่ากัน และมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม 23.20% ส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลท์ มีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุดที่ปริมาณการแทนที่ 50% เช่นกัน แต่ค่ากำลังอัดมีค่าต่ำมาก เนื่องจากใช้ปริมาณการแทนที่ที่มากเกินไป

ตารางที่ 4 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ในส่วนผสม ที่อายุการบ่ม 28 วัน

CSR	SP30C	SP40C	SP50C	CP30S	CP40S	CP50S
2267	1848	1817	1618	1980	1832	1741
CSR	SD30C	SD40C	SD50C	CD30S	CD40S	CD50S
2267	2176	2060	2075	2211	2055	2014

5. สรุปผลการศึกษา

1) กำลังอัดของคอนกรีตโครงสร้างมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลท์แทนที่ทราย 40% มีค่ากำลังอัดสูงที่สุด โดยมีค่ากำลังอัด 234 ksc และมีค่าหน่วยน้ำหนัก 1832 kg/m^3 ที่อายุการบ่ม 28 วัน

2) กำลังอัดของคอนกรีตโครงสร้างมวลเบาที่ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ทราย 30% มีค่ากำลังอัดสูงที่สุด โดยมีค่ากำลังอัด 298 ksc และมีค่าหน่วยน้ำหนัก 2211 kg/m^3 ที่อายุการบ่ม 28 วัน

3) การแทนที่ด้วยเพอร์ไลท์ได้คอนกรีตมวลเบาโครงสร้างที่มีหน่วยน้ำหนักที่ต่ำกว่าการแทนที่ด้วยไดอะตอมไมท์ เนื่องจากเพอร์ไลท์มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า มีความพรุนมากกว่าไดอะตอมไมท์

4) ทั้งการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ในทุกอัตราส่วนมีค่ากำลังอัดต่ำมากเนื่องจากปริมาณการแทนที่ที่มากเกินไป

5) ทั้งการแทนที่ทรายด้วยไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์สามารถลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตได้ และได้กำลังอัดที่เหมาะสม ซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้างได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวงจำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และสุดท้ายขอขอบคุณ คุณศักดิ์สิทธิ์ พันทวี คุณกิตติ สุคำภา และคุณเทิดศักดิ์ แก้วเมืองน้อย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมาผู้ช่วยวิจัย

7. บรรณานุกรม

[1] จบริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด, 2548, ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ. ปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม.

[2] Pantawee S. and Sinsiri T. (2008). The Use of Natural Pozzolans in Lightweight Concrete. *The 3rd ACF International Conference-ACF/VCA 2008.*

[3] Pimraksa K. and Chindaprasirt P. (2008). Lightweight Bricks Made of Diatomaceous Earth, Lime and Gypsum. *Ceramics International. CERI-2954; No of Pages 8.*

[4] ประพัตร์ กรังพานิชย์, 2540. การนำกากแร่สังกะสีและวัสดุพรุนเบาเพอร์ไลท์มาผลิตเป็นคอนกรีตเบา. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13
14-16 พฤษภาคม 2551
ณ โรงแรมจอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา

ผลกระทบของปริมาณดินขาวเผาต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์

Effect of Quantity of Calcined Kaolin on Strength Development of Mortar

เมธาวี ศรีวัฒนพงศ์ (Methawee Sriwattanapong)[1]
ปณิธาน ทันจันทึก (Panitan Tunjuntuk)[1]
ธีรวัฒน์ สินศิริ (Theerawat Sinsiri)[2]

[1]นักศึกษาปริญญาโท, สาขาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา <panitan_t@hotmail.com>
[2]อาจารย์, หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้าง, สาขาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา <sinsiri@sut.ac.th>

บทคัดย่อ : บทความฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาวัสดุปอซโซลานสำหรับคอนกรีต โดยนำดินขาวดิบจากจังหวัดลำปางไปปรับปรุงคุณภาพ โดยการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่งโมง และแปรผันชั้นความหนาในการเผา 3 ระดับ คือ 1 เซนติเมตร, 5 เซนติเมตร, 10 เซนติเมตร หลังจากนั้นใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้มีค่าเท่ากับปริมาณน้ำที่ความข้นเหลวปกติ (การไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 105 ถึง115) ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์

ผลการทดสอบพบว่ามอร์ต้าที่ผสมดินขาวที่ชั้นความหนา 10 เซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน มีการพัฒนากำลังดีที่สุด และทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยดินขาวเผาที่ความหนา 10 เซนติเมตร ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าที่อายุ 60 วัน เมื่อแทนที่ดินขาวเผาที่ร้อยละ 10 ทำให้มอร์ต้าร์มีการพัฒนากำลังอัดสูงกว่าส่วนผสมควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

ABSTRACT : This paper is a part of study aimed to improve local pozzolan material for concrete. Kaolin to burn at 800 Celsius with 6 hours by varying the ratio of Kaolin from 1 centimeter (MK1), 5 centimeters (MK5), 10 centimeters (MK10) and used to partially replace Portland cement type I (OPC) at the replacement of 20 % by weight of binder (PMK20). The water to binder ratio (W/B) of normal consistency (a mixture with the flow of 105-115 percent) was used. The compressive strength of mortars were carried out.

The results indicated that the blended concrete with Metakaolin (MK) at the layer of 10 centimeters appeared to yield the highest compressive strength at the age of 28 days. After that the MK were used to replace Portland cement at the rates of 10, 20, 30, 40, and 50% by weight of binder. The results shown that the replacement of OPC by MK of 10 % was higher compressive strength than control mortar.

KEYWORDS : Calcined kaolin, Metakaolin, Compressive Strength

1. ความสำคัญของปัญหา

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าปัจจุบันการก่อสร้างส่วนใหญ่มักใช้คอนกรีตเป็นวัสดุหลัก ซึ่งภายในคอนกรีตประกอบด้วย 1. ซีเมนต์ 2.ทราย 3.หิน และ 4.น้ำ เป็นองค์ประกอบสำคัญ โดยมีซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานมวลรวมให้จับตัวกันดี นั่นหมายความว่าซีเมนต์เป็นตัวสำคัญที่ทำให้กำลังของคอนกรีตสูงขึ้น แต่ปัญหาของปูนซีเมนต์ คือ กรรมวิธีการผลิตจะมีการปล่อยของเสียออกมาในรูปแบบของฝุ่นละออง เกิดผลกระทบกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงเล็งเห็นความสำคัญของปัญหาสิ่งแวดล้อม จึงได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของดินขาวที่มีผลต่อมอร์ต้าร์ เพื่อจะนำเอาดินขาวไปแทนที่ซีเมนต์ในอัตราส่วนที่ทำให้มอร์ต้าร์ยังคงคุณสมบัติทางด้านกำลังเช่นเดิม

ดินขาว หมายถึง ดินที่มีสีขาวหรือสีซีดจางทั้งในสภาพที่ยังไม่ได้เผาและเผาแล้ว ดินขาวมีส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นแร่ดินกลุ่ม Kaolinite และมีความสัมพันธ์กับมัสโคไวท์ ไมกา อิลไลท์ ควอซต์ และอาจมีมอนต์มอริลโลไนท์ ซึ่ง คำว่า "เกาลิน" มาจากภาษาจีนแปลว่าภูเขาสูง ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของดินขาวในประเทศจีน

ดินขาวเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในเมืองไทย จัดเป็นแร่ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมเพราะ นำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่างๆได้มากมาย เช่น อุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรม สี เป็นต้น ดินขาวส่วนใหญ่มีส่วนประกอบด้วยแร่ดินกลุ่ม Kaolinite เมื่อผ่านกระบวนการเผาที่เหมาะสมจะได้ซิลิกา (SiO_2) และ อลูมินา (Al_2O_3)

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของดินขาวดิบ ($Al_2Si_2O_3$ (OH) $_4$) จะแตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ การนำดินขาวดิบมาผสมกับคอนกรีตโดยตรงอาจทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติที่ไม่แน่นอนจากผลการวิจัยของ [1] พบว่ามอร์ต้าร์ผสมดินขาวดิบจากแหล่งในประเทศไทยที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนให้กำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม ในขณะที่มอร์ต้าร์ที่ผสมดินขาวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น

การปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน โดยการนำดินขาวดิบมาผ่านกระบวนการเผาเพื่อเป็นการปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมีทำให้โครงสร้างภายในมีการเปลี่ยนแปลงกลายสภาพเป็นดินขาว ($Al_2O_3.2SiO_2$; AS_2) ซึ่งมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้ผสมกับคอนกรีต ดังสมการ [2]

$$Al_2Si_2O_3(OH)_4 \xrightarrow{\text{ความร้อน}} Al_2O_3.2SiO_2 + 2H_2O \qquad (1)$$

นอกจากนี้ [3] ได้ศึกษาดินขาวดิบจากแหล่งจังหวัดลำปาง โดยนำดินขาวดิบที่ผ่านการล้าง (Washed Kaolin) และดินขาวดิบที่ผ่านการบด (Crushed Kaolin) มาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส พบว่ากำลังต้านทานแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมดินขาวที่ได้จากการเผาดินขาวดิบที่ผ่านการล้าง มีค่าสูงกว่าดินขาวดิบบดร้อยละ 6.4 และได้ทำการทดลองหาอุณหภูมิในการเผาที่เหมาะสมโดยแปรผันอุณหภูมิที่ 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาคือ 800 องศาเซลเซียส

3. ระเบียบวิธีวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ใช้ดินขาวจากจังหวัดลำปาง นำมาล้างผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเผา 6 ชั่วโมง เผาดินขาวที่ความหนา 1 cm ,5 cm และ 10 cm ทำการบดและคัดขนาดโดยการล้างผ่านตะแกรงเบอร์ 325 และทำการหล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 5x5x5 cm แล้วแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาว 5 ,10 ,20 ,30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ โดยเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์มาตรฐาน (ซีเมนต์ : ทราย = 1:2.75) และศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructure) รวมไปถึงการทดสอบเพื่อหาปริมาณน้ำและระยะเวลาในการก่อตัว

4. ผลการวิจัย

4.1 ลักษณะทางกายภาพของดินขาวเผาที่ความหนาต่างๆ

ดินขาวที่ไม่ได้ผ่านการเผามีลักษณะเป็นสีขาวออกเหลือง ซึ่งยิ่งเผาที่ความหนาลดลงสีของดินขาวจะเปลี่ยนเป็นสีขาวอมส้มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบความละเอียดของดินขาวกับปูนซีเมนต์ พบว่า ดินขาวมีความละเอียดน้อยกว่าปูนซีเมนต์ ดินขาวยังคงมีการเกาะตัวกันอยู่เล็กน้อย

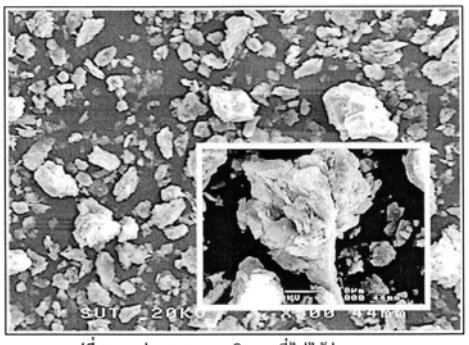
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีของดินขาวลำปาง

องค์ประกอบทางเคมี	ดินขาวลำปาง
Al_2O_3	25.613
SiO_2	64.355
Fe_2O_3	1.662
S	0.123
K_2O	6.636
CaO	0.598
Mn	0.205
LOI	6.76

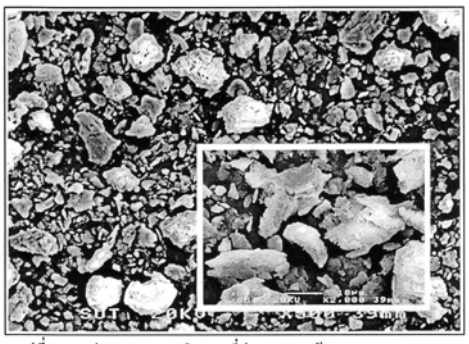
4.2 ผลการทดสอบ Scanning Electron Microscopy (SEM) ที่การเผาที่ความหนาต่าง ๆ

จากการนำเอาดินขาวที่ผ่านการเผาที่ความหนา 1, 5, 10 cm และไม่ผ่านการเผา ไปทำการส่องดูโครงสร้างและลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) พบว่า

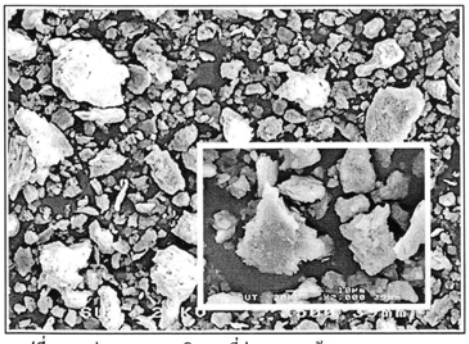
- ดินขาวที่ไม่ผ่านการเผา มีลักษณะเป็นผลึก เป็นแผ่นว่างทับซ้อนกันหลาย ๆแผ่น รูปก้อนมีลักษณะเป็นเหลี่ยมค่อนข้างมาก (รูปที่ 1)
- ดินขาวที่ผ่านการเผาที่ความหนา 1 cm, 5 cmม, และ 10 cm มีลักษณะเป็นผลึก เป็นวางซ้อนกันหลาย ๆ แผ่น แต่รูปก้อนมีความเหลี่ยมน้อยลง (รูปที่ 2, 3, และ 4 ตามลำดับ)



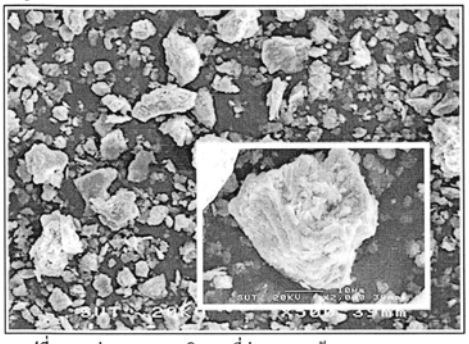
รูปที่ 1 ภาพถ่าย SEM ของดินขาวที่ไม่ได้ผ่านการเผา



รูปที่ 2 ภาพถ่าย SEM ของดินขาวที่ผ่านการเผาด้วยความหนา 1 cm



รูปที่ 3 ภาพถ่าย SEM ของดินขาวที่ผ่านการเผาด้วยความหนา 5 cm



รูปที่ 4 ภาพถ่าย SEM ของดินขาวที่ผ่านการเผาด้วยความหนา 10 cm

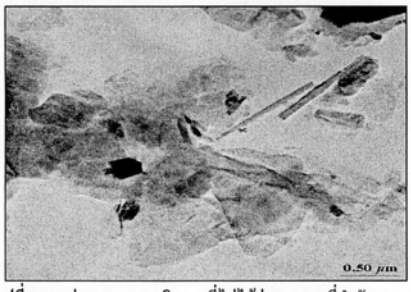
4.3 ผลการทดสอบ Tranmission Electron Microscopy (TEM) ของดินขาวที่ไม่ได้ผ่านการเผา

TEM ใช้ในการศึกษาโครงสร้างภายในของตัวอย่าง โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องผ่านวัตถุตัวอย่างที่ศึกษา ซึ่งต้องมีลักษณะบางเป็นพิเศษ ความหนาประมาณ 500 mm ตัวอย่างที่จะนำมาศึกษาด้วยเครื่อง TEM จะต้องมีความบางมากๆ เพื่อที่จะทำ

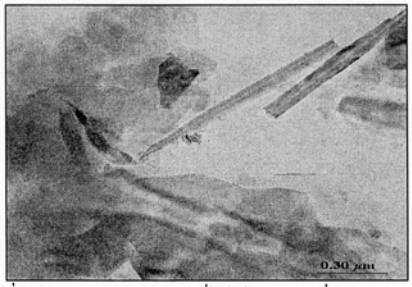
ให้อิเล็กตรอนสามารถส่องผ่านไปได้ โดยนำดินขาวไปกวนกับน้ำมันก๊าด เพื่อให้ดินขาวกระจายตัว หลังจากนั้นนำดินขาวไปหยดลงช่องกริด ต้องไม่มากเกินไป และนำไปทำการส่องดูด้วยเครื่อง Tranmission Electron Microscopy (TEM) พบว่า

- ดินขาวที่ไม่ผ่านการเผามีลักษณะโครงสร้างภายในเป็นผลึกเป็นแผ่นวางทับซ้อนกันหลายๆแผ่น มีลักษณะเป็นก้อนมีเหลี่ยมค่อนข้างมาก และมีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยมยาวปนอยู่ (รูปที่ 5, 6, 7, 8)

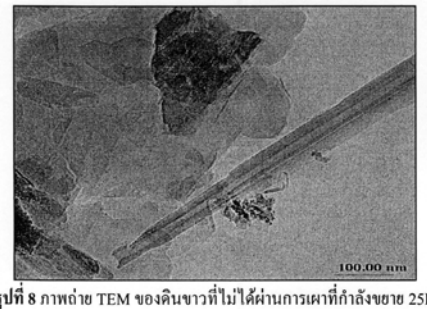
รูปที่ 5 ภาพถ่าย TEM ของดินขาวที่ไม่ได้ผ่านการเผาที่กำลังขยาย 1K



รูปที่ 6 ภาพถ่าย TEM ของดินขาวที่ไม่ได้ผ่านการเผาที่กำลังขยาย 5



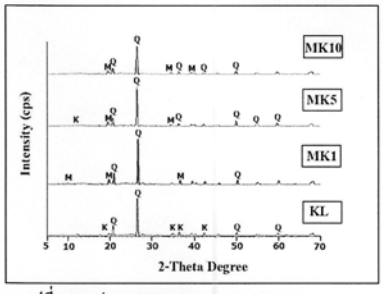
รูปที่ 7 ภาพถ่าย TEM ของดินขาวที่ไม่ได้ผ่านการเผาที่กำลังขยาย 10K



รูปที่ 8 ภาพถ่าย TEM ของดินขาวที่ไม่ได้ผ่านการเผาที่กำลังขยาย 25K

4.4 ผลการทดสอบ X- Ray Diffraction Analysis (XRD)

ผลการนำเอาดินขาวที่ผ่านการเผาที่ความหนา 1, 5, 10 cm และไม่ผ่านการเผา ไปทำการทดสอบด้วยเครื่อง XRD พบว่า ดินขาวก่อนทำการเผามี Kaolin (K) และ Quartz (Q) อยู่จำนวนหนึ่ง เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศา Kaolin จะเกิดการเปลี่ยนไปเป็น Metakaolinส่วน Quartz ยังคงมีอยู่ แต่ปริมาณลดลงเมื่อเพิ่มความหนาของการเผา



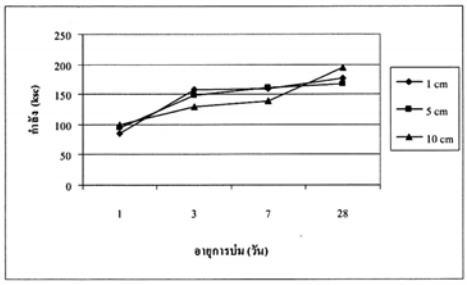
รูปที่ 9 กราฟ XRD ของ KL, MK1, MK5 และ MK10

4.5 ผลการทดสอบกำลังของมอร์ต้าร์ที่การเผาด้วยความหนาต่าง ๆ

จากผลการทดสอบ (ตารางที่ 2 และรูปที่ 10) จะเห็นว่ากำลังของมอร์ต้าร์ที่ใช้ดินขาวแทนที่ซีเมนต์ 20% และที่การเผาด้วยความหนาต่าง ๆ พบว่า ดินขาวที่ผ่านการเผาด้วยความหนา 1 cm และ 5 cm กำลังในช่วงแรก 1-5 วัน มีการพัฒนากำลังไปอย่างต่อเนื่อง และหลังจากวันที่ 5 ไป กำลังค่อนข้างจะคงที่ ส่วนดินขาวที่ผ่านการเผาด้วยความหนา 10 cm ในช่วงแรกมีการพัฒนากำลังช้า แต่กำลังจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงที่ 28 วัน และมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นต่อไป

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบกำลังของมอร์ต้าร์ที่การเผาด้วยความหนาต่าง ๆ

ความหนาในการเผา	กำลังเฉลี่ย (ksc)			
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน
1 cm	86.13	157.80	160.00	176.67
5 cm	94.40	148.80	161.20	168.27
10 cm	99.20	129.80	138.53	195.33



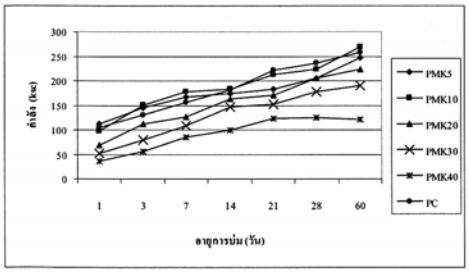
รูปที่ 10 แสดงการพัฒนากำลังของมอร์ต้าร์ที่เผาด้วยความหนาต่าง ๆ

4.6 กำลังมอร์ต้าร์ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ต่าง ๆ

ผลการทดสอบกำลังมอร์ต้าร์ที่ได้มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยปูนขาวที่การเผาด้วยความหนา 10 cmที่ 0%, 5%, 10%, 20%, 30%, และ 40% โดยเลือกใช้ดินขาวที่เผาด้วยความหนา 10 เซนติเมตร ซึ่งเป็นความหนาในการเผาดินขาวที่ให้กำลังมากที่สุด (ตารางที่ 3 และรูปที่ 11) ซึ่งจากผลการทดสอบ การแทนซีเมนต์ด้วยดินขาวที่ 10% จะให้กำลังแก่มอร์ต้าร์ได้ดีที่สุด

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังของมอร์ต้าร์ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ต่าง ๆ

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลังมอร์ต้าร์ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ต่างๆ (ksc)					PC100 (ksc)
	PMK 5	PMK 10	PMK 20	PMK 30	PMK 40	
1	113.2	97.9	69.9	52.9	36.1	106.0
3	144.8	151.2	112.0	80.5	56.1	130.9
7	167.5	177.3	126.5	108.5	85.2	157.2
14	174.7	184.1	162.9	146.7	99.9	182.1
21	183.6	213.0	170.8	152.4	123.6	221.0
28	206.0	222.8	206.0	178.8	124.8	236.6
60	246.6	269.9	223.0	191.2	122.2	258.0



รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของมอร์ต้าร์ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ต่างๆ กับระยะเวลาการบ่ม

4.7 ผลการทดสอบ Normal consistency of hydraulic cement และSetting time of hydraulic cement

จากตารางที่ 4 ผลการทดสอบหาความข้นเหลวปกติของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าความข้นเหลวจะอยู่ระหว่าง 24 % – 28 % โดยผลจากการทดสอบตัวอย่างทดสอบปริมาณน้ำที่จะทำให้ตัวอย่างทดสอบเกิดสภาวะข้นเหลวมีค่าเท่ากับ 28 % ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ถือว่าตัวอย่างทดสอบอยู่ในเกณฑ์ทั่วไป และผลการทดสอบ Setting time of hydraulic cement พบว่าระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมกับดินขาวเผาที่ความหนา 10 cm โดยใช้เข็มมาตรฐานแบบไวแคตในการทดสอบนั้น ปรากฏว่าระยะการจม (Penetration) ของเข็มที่ 25 mm ใช้ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้นที่ 125 นาที

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบ Normal consistency of hydraulic cement และSetting time of hydraulic cement

	Normal consistency (%)	Initial Setting time (min)	Final Setting time (min)
PMK 10	28	125	165
PC 100	27	67	108

5. อภิปรายและสรุปผล

จากการทดสอบคุณสมบัติของดินขาวที่มีผลต่อมอร์ต้าร์โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สามารถสรุปผลวิจัยทั้งในด้านคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงเคมีได้ดังนี้

5.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินขาว

จากการนำเอาดินขาวไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศา เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ลักษณะของดินขาวที่ผ่านการเผาจะมีสีเปลี่ยนไป จากสีขาวอมเหลืองกลายเป็นสีเหลืองอมส้ม ซึ่งถ้ายิ่งเผาด้วยความหนาน้อยเท่าไรสีของดินขาวก็จะออกสีส้มขึ้นเรื่อย ๆ ในเรื่องของความละเอียด ยังมีความละเอียดน้อยเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์และจากผลการนำเอาดินขาวที่ผ่านการเผาที่ความหนา 1, 5, 10 cm และไม่ผ่านการเผา ไปทำการทดสอบด้วยเครื่อง XRD พบว่า ดินขาวก่อนทำการเผาจะมี Kaolin และ Quartz อยู่จำนวนหนึ่งเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศา พบว่า Kaolin จะเกิดการเปลี่ยนไปเป็น Metakaolin ส่วน Quartz ยังคงมีอยู่แต่ปริมาณลดลงเมื่อเพิ่มความหนาของการเผา

5.2 ความหนาที่เหมาะสมในการเผาดินขาวและเปอร์เซ็นต์การแทนที่ซีเมนต์ที่เหมาะสม

จากการทดสอบพบว่า การเผาดินขาวที่ความหนา 10 เซนติเมตร เป็นความหนาที่เหมาะสมแก่การใช้งานและพบว่าเปอร์เซ็นต์การแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวที่เหมาะสม คือ 10 % เนื่องจากเป็นความหนาและเปอร์เซ็นต์การแทนที่ที่ทำให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์สูงสุด

5.3 ลักษณะการพัฒนากำลังของมอร์ต้าร์

จากการทดสอบพบว่า กำลังของมอร์ต้าร์มีการพัฒนากำลังช่วงแรกค่อนข้างใกล้เคียง เมื่อเทียบกับ มอร์ต้าร์ควบคุม แต่ช่วงปลายกำลังของมอร์ต้าร์ที่การแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาว 10 % จะมีกำลังเพิ่มสูงขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ความสะดวกด้านอุปกรณ์เครื่องมือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย ขอบคุณ คุณธวัชชัย ใจจิต คุณอดิศักดิ์ กันเมล์ คุณจุฑารัตน์ ขอจุลช้วน คุณชิดชนก รักดี และคุณศักดิ์สิทธิ์ พันทวี รวมถึงผู้ร่วมวิจัย ผู้ที่เกี่ยวข้องในการวิจัยในครั้งนี้ทุกท่าน

7. บรรณานุกรม

[1] Sayamipuk, S. 2000.Development of Durability Mortar and Concrete Incorporating Metakaolin from Thailand. Ph.D.Thsis, Asian Inst. Technol.

[2] Salvador, S. 1995. Pozzolanic Properties of Flash-Calcined Kaolinite: A Comparative Study with Soak- Calcined Products. Cem.Concr. Res. 25(1): 102-112.

[3] Hensadeekul, T. 1995.Use of Metakaolin from Lampang Province as a Pozzolana. M.Eng.Thsis, Asian Inst. Technol

ประวัติผู้เขียน

นางสาวเมธาวี ศรีวัฒนพงศ์ เกิดวันที่ 16 ธันวาคม พ.ศ.2525 ที่อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษา เมื่อ พ.ศ.2543 ที่โรงเรียนสุรนารีวิทยา จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต) เมื่อ พ.ศ.2548 สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2550 ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยได้นำประสบการณ์ และความรู้จากการเป็นผู้ช่วยสอนมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี และได้มีบทความวิจัยตีพิมพ์ภายในประเทศ 2 บทความ ดังปรากฏในภาคผนวก ง.