

ผลกระทบของปริมาณซิลิกาออสฐานในไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และ
ดินขาวเผา ต่อกำลังอัดและปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์ผสม

นางสาวปิยะฉัตร สุภวิทยาเจริญกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2554

**INFLUENCE OF AMORPHOUS SILICA IN DIATOMITE,
PERLITE AND METAKAOLIN ON THE COMPRESSIVE
STRENGTH AND POZZOLANIC REACTION OF
BLENDED CEMENT PASTE**

Piyachat Suphawithayajaroenkun

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 2011

ผลกระทบของปริมาณซิลิกาออสฐานในไดอะทอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวเผา
ต่อกำลังอัดและปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์พิเศษผสม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.มงคล จิรวรรณเดช)

กรรมการ

(อ. ดร.ทนงศักดิ์ พิศาลสิน)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

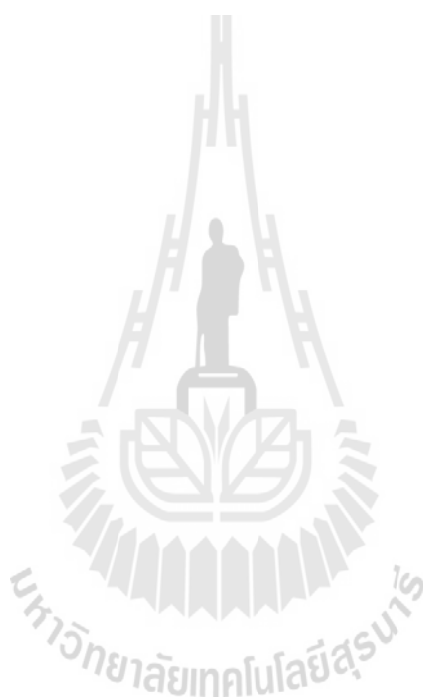
ปิยะฉัตร ศุภวิทยาเจริญกุล : ผลกระทบของปริมาณซิลิกาอสัณฐานในไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวเผา ต่อกำลังอัดและปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์ผสม (INFLUENCE OF AMORPHOUS SILICA IN DIATOMITE, PERLITE AND METAKAOLIN ON THE COMPRESSIVE STRENGTH AND POZZOLANIC REACTION OF BLENDED CEMENT PASTE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ, 125 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาหาปริมาณซิลิกาอสัณฐานในไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาว ที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง ซึ่งส่งผลต่อกำลังอัดและปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์ผสม งานวิจัยวัดหาปริมาณซิลิกาอสัณฐานในวัสดุทดสอบ โดยใช้เทคนิครังสีเอกซ์เรย์ (X-ray Diffraction Analysis) การทดสอบกำลังอัดและปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำการทดสอบโดย ผสมซีเมนต์เพสต์ควบคุมและตัวอย่างทดสอบ ที่ผ่านการควบคุมขนาดอนุภาคของวัสดุให้ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ ทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.42 ในทุกส่วนผสม ทดสอบกำลังที่อายุทดสอบ 3 28 และ 60 วัน

ผลการวิเคราะห์ปริมาณซิลิกาอสัณฐาน พบว่าไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวเผา มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานอยู่ระหว่าง 43.82-14.52 57.47-22.77 14.18-4.64 ตามลำดับ การทดสอบซีเมนต์เพสต์ผสม พบว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุทดสอบแต่ยังต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมที่อายุทดสอบ 3 และ 28 วัน ในขณะที่อายุทดสอบ 60 วัน ตัวอย่างทดสอบจะมีการพัฒนากำลังจนสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม ในด้านการทดสอบปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์ผสมพบว่าเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมากกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมที่อายุทดสอบ 28 วัน ในทุกส่วนผสม

จากการศึกษาพบว่าปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานมีผลต่อกำลังอัดและปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์ผสมในลักษณะที่แปรผันตรงต่อกัน นอกจากนี้อุณหภูมิและ

ระยะเวลาเผามีผลต่อการเกิดปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน โดยอุณหภูมิและเวลาในการเผาที่สูงและนานมีแนวโน้มทำให้ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานต่ำลง



สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....



PIYACHAT SUPHAWITHAYAJAROENKUN : INFLUENCE OF
AMORPHOUS SILICA IN DIATOMITE, PERLITE AND METAKAOLIN ON
THE COMPRESSIVE STRENGTH AND POZZOLANIC REACTION OF
BLENDED CEMENT PASTE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
THEERAWAT SINSIRI, Ph.D., 125 PP.

DIATOMITE / PERLITE / KAOLINITE / AMORPHOUS SILICA / X- RAY
DIFFRACTION

The purpose of this research is to determine the percentage by weight of the amorphous silica in diatomite perlite and kaoline which were burnt in different temperature of 600 700 and 800 degree celsius and time at 4 6 and 8 hours. The percentage by weight of the amorphous silica affect the compressive strength and degree of pozzolanic reaction. Amorphous silica in samples was analyzed by using X-ray Diffraction Analysis (XRD). The particle sizes of the diatomite perlite and metakaolin were controlled to be the same as type I Portland cement. Pozzolanic material was used to replace Portland cement type I at 20% by weight for all blended cement paste mixture. The water to binder ratio (w/b) of 0.42 was used for all the cement paste mixtures.

The result was found that the diatomite perlite and metakaolin had amorphous silica in the range of 43.82 to 14.52 57.42 to 22.77 and 14.18 to 4.64 respectively. The compressive strength of the blended cement paste and the control cement paste increased with age. The test results have shown that the compressive strength of the blended cement paste at the age of 3 and 28 days was lower than the compressive strength of the control cement paste at the same time, while at the age of 60 days,

the compressive strength of the blended cement paste sample was higher than the compressive strength of the control cement paste. As for the degree of pozzolanic reaction, all of the blended cement paste were higher than the control cement paste at the age of 28 days.

The percentage by weight of amorphous silica was in direct variation with the compressive strength and the degree of pozzolanic reaction. In addition, the temperature and the period of time of burning influenced the percentage by weight of amorphous silica since they decreased when were burnt in higher temperature and longer period of time.



School of Civil Engineering

Academic Year 2011

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ขอขอบพระคุณ บุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีรวัฒน์ สินศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำแนะนำในการวางแผนการศึกษาเป็นอย่างดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล จิรวชิรเดช กรรมการที่กรุณาให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาในการเขียน และตรวจทานวิทยานิพนธ์ จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.ทนงศักดิ์ พิศาลสิน กรรมการที่คอยให้คำแนะนำทั้งทางด้านวิชาการ และทางด้านคุณธรรมจริยธรรมในการดำรงชีวิต

คุณวัน โชค เครื่องหงส์ นักศึกษาระดับปริญญาเอก คอยให้ความช่วยเหลือด้านความรู้ และวิชาการตลอดจนคำแนะนำที่ดีตลอดมา

เจ้าหน้าที่สถานวิจัย เจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่คอยดูแลเอาใจใส่ และอำนวยความสะดวกในเรื่องเอกสารต่าง ๆ และผู้ที่มีส่วนร่วมในงานวิจัยนี้ทุกท่าน

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

ปิยะฉัตร สุภวิทยาเจริญกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ท
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ปรีทรรศน์วรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 วัสดุปอชโซลาน.....	6
2.3 ปอชโซลานธรรมชาติ.....	12
2.4 ไดอะตอมไมท์.....	14
2.5 เพอร์ไลท์.....	21
2.6 ดินขาว.....	29
2.7 ซิลิกา หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์.....	35
2.8 ทฤษฎีและหลักการของรังสีเอ็กซ์.....	38
2.9 สรุปปรีทรรศน์วรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	48

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	51
3.1	วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	52
3.2	สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	54
3.3	การทดสอบหาปริมาณซิลิกาออสซิลานในไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน โดยวิธีวิเคราะห์โดยรังสีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน.....	55
3.3.1	การสร้างกราฟมาตรฐานของซิลิกาไดออกไซด์ออสซิลาน.....	55
3.3.2	การวิเคราะห์ปริมาณซิลิกาไดออกไซด์ออสซิลาน.....	58
3.4	การทดสอบหาคคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ ไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน.....	60
3.4.1	ทดสอบหาขนาดอนุภาคโดยใช้เครื่อง.....	60
3.4.2	ทดสอบหาความชื้นเหลือปกติ.....	61
3.4.3	ทดสอบหองค์ประกอบทางเคมี.....	61
3.4.4	ถ่ายภาพขยายกำลังสูง.....	61
3.5	การทดสอบดัชนีกำลังผสมวัสดุ.....	62
3.5.1	ทดสอบหาดัชนีกำลังของไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน.....	62
3.5.2	ทดสอบหาดัชนีกำลังของซีเมนต์เพสต์ ควบคุมและซีเมนต์เพสต์แทนที่ด้วยทราย.....	63
3.5.3	ทดสอบการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน.....	64
4	ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล.....	65
4.1	ผลของร้อยละ โดยน้ำหนักของซิลิกาออสซิลาน.....	65
4.1.1	กราฟมาตรฐานซิลิกาไดออกไซด์ออสซิลาน.....	65

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.2 ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน ในไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีน ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง.....	68
4.2 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ ไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีน.....	71
4.3 องค์ประกอบทางเคมีของ ไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีน.....	72
4.3.1 สารประกอบหลักในไดอะตอมไมท์.....	72
4.3.2 สารประกอบหลักในเพอร์ไลต์.....	72
4.3.3 สารประกอบหลักดินขาวปราจีน.....	72
4.4 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีน.....	74
4.5 คุณสมบัติด้านกำลังอัด.....	76
4.6 การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน.....	81
4.7 ผลของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน ต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในซีเมนต์พอสต์ผสม.....	82
4.8 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก ของซิลิกาอสัณฐาน.....	85
4.9 ผลของระยะเวลาที่ใช้เผาต่อปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ ซิลิกาอสัณฐาน.....	87
4.10 การเปรียบเทียบความเป็นปอซโซลานของไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์และดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง.....	89

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5 บทสรุป.....	91
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	91
5.1.1 สมการมาตรฐานที่ใช้หาปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก ของซิลิกาออสันฐาน.....	91
5.1.2 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีนต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซิลิกาออสันฐานโดยจำกัดการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง.....	92
5.1.3 ผลของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาออสันฐาน ต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน.....	92
5.1.4 คุณสมบัติความเป็นปอซโซลานของไดอะตอมไมท์เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีน โดยจำกัดการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง.....	93
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	94
รายการอ้างอิง.....	95
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบ X-Ray Diffraction Analysis ของกราฟมาตรฐาน ไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผา.....	99
ภาคผนวก ข คุณสมบัติพื้นฐานและกำลังอัดของไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีน.....	103
ภาคผนวก ค บทความที่ได้รับกาตีพิมพ์.....	114
ประวัติผู้เขียน.....	123

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อกำหนดทางเคมีของปอชโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618.....8
2.2	ข้อกำหนดทางเคมีของปอชโซลานเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C8
2.3	ข้อกำหนดทางกายภาพ ตามมาตรฐาน ASTM C 618.....9
2.4	ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C 618.....10
2.5	คุณสมบัติของเถ้าลอยและปอชโซลานธรรมชาติ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008).....13
2.6	องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของไคอะตอมไมท์ จากแหล่งลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008).....16
2.7	องค์ประกอบทางเคมีของไคอะตอมไมท์ประเทศกรีซ เยอรมันและเคนมาร์ก (Fragoulisa, 2004).....19
2.8	เปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของไคอะตอมไมท์ประเทศ ตุรกีกับปูนซีเมนต์ (Aydin และ Gul, 2007).....21
2.9	เปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยเพอร์ไลต์กับปูนซีเมนต์ ผสมแบบธรรมดา (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546).....23
2.10	องค์ประกอบทางเคมีของหินเพอร์ไลต์ (สำนักงานเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)..... 23
2.11	เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ กับเพอร์ไลต์ (จิตรกร ตังอนุสรณ์สุข, 2548).....27
2.12	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน และเพอร์ไลต์ (Demirboga, Orung และ Gul, 2001).....29

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
2.13	คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และดินขาว.....	30
2.14	องค์ประกอบทางเคมีของดินขาว.....	32
2.15	องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของดินขาวเปรียบเทียบ ตามมาตรฐาน ASTM C 618.....	33
3.1	สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	54
3.2	อัตราส่วนผสมระหว่างซิลิกาไดออกไซด์ออสติฐาน ซิลิกาไดออกไซด์ผลึกและอลูมินาออกไซด์ (AM : C : AI).....	56
3.3	อัตราส่วนผสมระหว่างตัวอย่างทดสอบกับ อลูมินาออกไซด์ (S : AI).....	58
3.4	จำนวนตัวอย่างทดสอบกำลังอัดผสมวัสดุ.....	62
3.5	จำนวนตัวอย่างที่ใช้การทดสอบกำลังอัดของ ซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์เพสต์ผสมด้วยทราย.....	63
4.1	แสดง Intensity ของซิลิกาออสติฐาน และอลูมินา.....	65
4.2	แสดง Intensity และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ ซิลิกาออสติฐานในแต่ละตัวอย่างทดสอบ.....	70
4.3	แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติของไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์และดินขาวปราจีน.....	72
4.4	แสดงการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีน ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF).....	73
4.5	กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุม และซีเมนต์เพสต์ผสม ไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผา ที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C ระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง.....	76
4.6	ร้อยละปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์เพสต์ผสม.....	81

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.1	แสดงผลการทดสอบ intensity ของซิลิกาอสัณฐาน..... 100
ก.2	แสดงผลการทดสอบอัตราส่วน intensity ของซิลิกาอสัณฐานต่ออลูมินาออกไซด์..... 100
ก.3	แสดงผลการทดสอบ intensity ของซิลิกาอสัณฐานในไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 °C ระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง..... 101
ข.1	แสดงผลการทดสอบความชื้นเหลวปกติของไคอะตอมไมท์..... 104
ข.2	แสดงผลการทดสอบความชื้นเหลวปกติของเพอร์ไลท์..... 105
ข.3	แสดงผลการทดสอบความชื้นเหลวปกติของดินขาวปราจีน..... 106
ข.4	แสดงผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของไคอะตอมไมท์..... 107
ข.5	แสดงผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของเพอร์ไลท์..... 108
ข.6	แสดงผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของดินขาวปราจีน..... 109
ข.7	แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์เพสต์ผสม ไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีนผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 °C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมงที่อายุ 3 วัน..... 110
ข.8	แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์เพสต์ผสม ไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีนผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 °C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมงที่อายุ 28 วัน..... 112
ข.9	แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์เพสต์ผสม ไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีนผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 °C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมงที่อายุ 60 วัน..... 114

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ภาพขยายของไดอะตอมไมท์ (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550).....	14
2.2	ภาพถ่าย SEM ของไดอะตอมไมท์จากแหล่งลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008).....	16
2.3	กราฟ DTA และ TGA ของไดอะตอมไมท์ลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008).....	17
2.4	ภาพถ่าย SEM ของอิฐที่ทำการแปรผันอุณหภูมิในการเผา ไดอะตอมไมท์: (Kedsarin Pimraksa, 2008).....	18
2.5	ภาพถ่าย SEM ของไดอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ (Fragoulisa et al., 2004).....	19
2.6	ภาพขยายของเพอร์ไลต์ (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550).....	21
2.7	ภาพขยายอนุภาคดินขาว.....	31
2.8	การกระจายตัวของอนุภาคดินขาว.....	31
2.9	ภาพวิเคราะห์ X-Ray Diffraction Spectroscopie ของดินขาว.....	33
2.10	การเกิดรังสีเอ็กซ์โดยการกระตุ้นด้วยอนุภาค.....	39
2.11	การเกิดรังสีเอ็กซ์โดยการกระตุ้นด้วยโฟตอน.....	39
2.12	การเกิดรังสีเอ็กซ์โดยการสลายตัวแบบการเปลี่ยนแปลงภายใน.....	40
2.13	แสดงกราฟที่สร้างสำหรับวิธีเทียบมาตรฐาน.....	46
2.14	แสดงตัวอย่างกราฟจากวิธีการเติมสารมาตรฐาน.....	47
3.1	แผนผังการดำเนินงานวิจัย.....	51
3.2	ภาพถ่ายสารมาตรฐานจากภายนอก.....	52
3.3	ภาพวัสดุปอซโซลานที่ใช้ในงานวิจัย.....	53
3.4	เครื่อง X-ray Diffraction Analysis.....	57
3.5	เครื่องชั่งทศนิยมสามตำแหน่ง.....	57
3.6	เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (Laser Particle Size Analyzer).....	60
3.7	ชุดการทดสอบไวแคต (Vicat Apparatus).....	61

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1	กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของสารมาตรฐานจากภายนอก..... 66
4.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง weight of percent amorphous silica ต่อ IN_{AM} / IN_{AH} 67
4.2	กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของโคอะตอมไมท์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง..... 68
4.3	กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของเพอร์ไลต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง..... 69
4.4	กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของคินขาวปราจีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง..... 69
4.5	ภาพถ่าย SEM ของโคอะตอมไมท์..... 74
4.6	ภาพถ่าย SEM ของเพอร์ไลต์..... 75
4.7	ภาพถ่าย SEM ของคินขาวปราจีน..... 75
4.8	ภาพกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์ผสมโคอะตอมไมท์เผา อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง ที่อายุการทดสอบ 3 28 และ 60 วัน..... 78
4.9	ภาพกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์ผสมเพอร์ไลต์เผาอุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง ที่อายุการทดสอบ 3 28 และ 28 วัน..... 79
4.10	ภาพกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์คินขาวปราจีนเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง ผสมที่อายุการทดสอบ 3 28 และ 60 วัน..... 80
4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ โดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน กับร้อยละปฏิกิริยาปอซโซลานในโคอะตอมไมท์..... 83

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน กับร้อยละปฏิกิริยาปอซโซลานในเพอร์ไลต์.....	83
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน กับร้อยละปฏิกิริยาปอซโซลานในดินขาวปราจีน.....	83
4.14 กราฟเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไคอะตอมไมท์ ต่อปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน.....	84
4.15 กราฟเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเพอร์ไลต์ ต่อปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน.....	85
4.16 กราฟเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาดินขาวปราจีนต่อปริมาณ ร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน.....	86
4.17 กราฟเปรียบเทียบผลของระยะเวลาที่ใช้เผาไคอะตอมไมท์ต่อปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน.....	86
4.18 กราฟเปรียบเทียบผลของระยะเวลาที่ใช้เผาเพอร์ไลต์ต่อปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน.....	88
4.19 กราฟเปรียบเทียบผลของระยะเวลาที่ใช้เผาดินขาวปราจีนต่อปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน.....	88
4.20 กราฟเปรียบเทียบความเป็นปอซโซลานของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีน ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง.....	88
4.21 กราฟแสดงความเป็นปอซโซลานของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีน ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง.....	90
ข.1 ความชันเหลวปกติของไคอะตอมไมท์.....	104
ข.2 ความชันเหลวปกติของไคอะตอมไมท์.....	105

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	=	American Society for Testinh Material
SiO ₂	=	Silicadioxide
AlO ₂	=	Aluminadioxide
Ca(OH) ₂	=	Calcium hydroxide
CHS	=	Calcium Silicate Hydrate
CAH	=	Calcium Aluminate Hydrate
C ₃ S	=	Tricalcium Silicate
C ₂ S	=	Dicalcium Silicate
CaO	=	Calcium-oxide
SEM	=	Scaning Electron Microscope
DTA	=	Differencetial Thermal Analysis
TGA	=	Themal Gravity Analysis
LOI	=	Loss on Ignition
XRF	=	X-Ray fluorescence
ksc	=	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
°C	=	องศาเซลเซียส
DT...T...	=	ไดอะแกรมไมท์ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ.....องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา.....ชั่วโมง
PT...T...	=	เพอร์ไลต์ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ.....องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา.....ชั่วโมง
KT...T...	=	ดินขาวปราจีนผ่านการเผาที่อุณหภูมิ.....องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา.....ชั่วโมง
T	=	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา
H	=	ระยะเวลาที่ใช้เผา
AM	=	Amorphous silica
C	=	Crystal silica
Al	=	Alumina

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

A	=	กำลังอัดซีเมนต์เพสต์ผสมแทนที่ด้วยวัสดุทดสอบร้อยละ 20
B	=	กำลังอัดซีเมนต์เพสต์
X	=	อัตราส่วน intensity ของซิลิกาอสัณฐาน ต่อ intensity ของอลูมินา
IN_{AM}	=	intensity ของซิลิกาอสัณฐาน
IN_{Al}	=	intensity ของอลูมินา
ppm	=	part per million
%wt.	=	percent by weight



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในงานก่อสร้างอย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็น ที่อยู่อาศัย สะพาน อุโมงค์ ถนน ฯลฯ โดยวัสดุยึดประสานที่ใช้มากเป็นอันดับหนึ่งในการผลิตคอนกรีตคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงและพลังงานสูงมาก เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ซึ่งเป็นก๊าซที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming) การผลิตปูนซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ถึงปีละ 13,500 ล้านตัน หรือประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซที่ปล่อยออกมาในบรรยากาศทั้งหมด (McCaffrey, 2002) จากผลกระทบดังกล่าวจึงมีแนวคิดลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ โดยการหาวัสดุชนิดอื่นมาผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อผลิตปูนซีเมนต์ผสม (Blended cement) วัสดุดังกล่าวได้แก่ วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) ซึ่งวัสดุปอซโซลานได้เข้ามามีบทบาทในงานคอนกรีตผสม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์และเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น ตามมาตรฐาน ASTM วัสดุปอซโซลานคือวัสดุที่มีซิลิกา (Silica, SiO₂) เพียงอย่างเดียวหรือมีทั้งซิลิกา (Silica, SiO₂) และอลูมินา (Alumina, Al₂O₃) เป็นองค์ประกอบหลักหรือจัดเป็นสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต โดยปกติแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน (ASTM C 168, 2001) แต่ถ้าขนาดเม็ดมีความละเอียดสูงและมีความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate) เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชันหากแต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้ากว่า เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (ปริญญจินดาประเสริฐ และชัย จตุรพิทักษ์กุล, 2547) วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural pozzolan) เป็นวัสดุที่มีความน่าสนใจ ในการศึกษาวัสดุปอซโซลานจากการจำแนกตามมาตรฐาน ASTM C 168 จัดเป็นปอซโซลานชั้นคุณภาพ N (Class N) คือ ปอซโซลานธรรมชาติหรือปอซโซลานธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเผาแล้ว เพื่อให้ได้คุณภาพที่ต้องการ (อานนท์ ป้อมประสิทธิ์, 2545) วัสดุปอซโซลานธรรมชาติส่วนใหญ่แล้วจะผ่านการปรับปรุง เช่นกระบวนการให้ความร้อนในเตาเผาและบดให้ละเอียดเป็นผง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการศึกษาผลของวัสดุปอซโซลานที่ผ่านการปรับปรุงโดยการเผาต่อการใช้งานในคอนกรีตผสมหลายด้าน เช่น ด้านความสามารถในการเทได้หน่วงน้ำหนักของคอนกรีตที่ถูกแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานที่ผ่านการเผา ความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ ความต้านทานการซึมผ่านของกรด แต่ในด้านการนำวัสดุปอซโซลานที่ผ่านการเผาจัดหาปริมาณซิลิกาอสัณฐานต่อกำลังอัดและปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์เพสต์ยังคงค่อนข้างน้อย หากแต่ผลที่ได้ จะเป็นเกณฑ์บ่งชี้ถึงวิธีปรับปรุงวัสดุปอซโซลานให้มีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อใช้ในการพัฒนาวัสดุปอซโซลานเชิงเคมีในระดับจุลภาค (Microstructure) และนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ ได้แก่ ไดอะตอมไมท์ (Diatomite) เพอร์ไลท์ (Perlite) และดินขาวปราจีน (Kaolinite) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มแร่ธาตุผสมเพิ่มประเภทปอซโซลานธรรมชาติ (Natural pozzolan) ผ่านกระบวนการปรับปรุงโดยการเผา ซึ่งวัสดุทั้งสามนี้มีองค์ประกอบเคมีของซิลิกาไดออกไซด์อยู่มาก เหมาะแก่การนำมาวิเคราะห์หาปริมาณซิลิกาอสัณฐาน โดยใช้เทคนิครังสีเอกซ์เรย์ (X-ray diffraction method) เป็นวิธีปริมาณวิเคราะห์ที่ได้ผลแม่นยำ นอกจากนี้คุณสมบัติที่คืออย่างหนึ่งของวัสดุทดสอบทั้งสามชนิด คือ มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ และความพรุนสูง เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาหาปริมาณซิลิกาอสัณฐานในไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน ที่ผ่านการเผาตามอุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาที่กำหนด

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิกาอสัณฐานกับกำลังรับแรงอัดในไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน ที่ผ่านการเผาตามอุณหภูมิและระยะเวลาการเผาที่กำหนด

1.2.3 เพื่อทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิกาอสัณฐานและปฏิกิริยาปอซโซลานในไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน ที่ผ่านการเผาตามอุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาที่กำหนด

1.2.4 เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติความเป็นปอซโซลานของไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน ที่ผ่านการเผาตามอุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาที่กำหนด โดยอาศัยหลักเกณฑ์ของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิกาอสัณฐานและปฏิกิริยาปอซโซลาน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาโครงการวิจัยได้กำหนดขอบเขตของงานวิจัย ประกอบด้วยดังนี้

1.3.1 บดโคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีน ทำการควบคุมขนาดอนุภาคโดยเครื่องควบคุมขนาดอนุภาค (Laser Particle Size Analyzer) ให้มีขนาดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์

1.3.2 เผาโคอะตอมไมท์ที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ

1.3.3 เผาเพอร์ไลต์ที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ

1.3.4 เผาดินขาวปราจีนที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ

1.3.5 ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

1.3.6 ทราชที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำจากจังหวัดนครราชสีมาควบคุมขนาดอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์

1.3.7 น้ำที่ใช้ผสมและบ่มคอนกรีตเป็นน้ำประปา

1.3.8 ขนาดของก้อนตัวอย่างมาตรฐานทรงกระบอกขนาด 50X50X50 mm

1.3.9 ซิลิกาไดออกไซด์อสังฐาน หรือซิลิกาฟุ่มจากบริษัท SIGMA CHEMICAL ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99

1.3.10 ซิลิกาไดออกไซด์ในโครงสร้างที่เป็นผลึกจากบริษัท SIGMA CHEMICAL ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99

1.3.11 อลูมินาไดออกไซด์จากบริษัท SIGMA CHEMICAL ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99

1.3.12 ผสมโคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีน ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนดดังข้อ 1.3.1-1.3.3 แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.42 ผสมส่วนผสมตามมาตรฐาน ASTM C 311

1.3.13 ผสมทรายแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.42 ผสมส่วนผสมตามมาตรฐาน ASTM C 311

1.3.14 ทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์ผสมผสมที่ระยะเวลาการบ่ม 3 28 และ 60 วันตามมาตรฐาน ASTM C 311

1.3.15 สร้างกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟซีกาอสัณฐานต่อพื้นที่ได้กราฟพีคตัวแทนของอลูมินา กับร้อยละของการแทนที่ซีกาอสัณฐานโดยน้ำหนัก (สุธรรม ศรีหล่มสัก, 2543) หาค่าปริมาณซีกาอสัณฐานในไดอะทอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนดดังข้อ 1.3.1-1.3.3

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องรวมถึงวิธีการในการทดสอบ

1.4.2 จัดหาวัสดุ อุปกรณ์ และวางแผนดำเนินการทดสอบ

1.4.3 ทดสอบหาปริมาณซีกาอสัณฐาน โดยใช้เทคนิครังสีเอ็กซ์เรย์ (X-ray diffraction method)

1.4.4 ทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์เพสต์ผสมและบันทึกผล

1.4.5 วิเคราะห์ผล และสรุปผลการทดสอบ

1.4.6 สรุปผลการวิจัยและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถทราบถึงวิธีการปรับปรุงวัสดุให้มีคุณภาพมากที่สุด ในเชิงองค์ประกอบและปฏิกิริยาเคมีภายใน

1.5.2 สามารถนำวัสดุที่ได้ทดแทนปูนซีเมนต์เพื่อให้ได้กำลังอัดมาก

1.5.3 สามารถประยุกต์ใช้วัสดุธรรมชาติที่หาได้ในประเทศเพื่อใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีตและนำมาใช้ให้เกิดคุณค่ามากที่สุด

1.5.4 ช่วยลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์และลดภาวะโลกร้อน

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในปัจจุบันมีการศึกษาวัสดุปอชโซลานเพื่อนำมาเป็นวัสดุทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์มากขึ้น เนื่องด้วยวัสดุปอชโซลาน นอกจากจะทำให้ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลงแล้ว คุณสมบัติหลายประการยังเป็นประโยชน์ต่อโครงสร้างที่ถูกใช้งาน ได้อีกด้วย เช่น วัสดุปอชโซลานเพิ่มกำลังในระยะยาวให้กับคอนกรีตมากขึ้น ทำให้โครงสร้างที่ความแน่นทึบป้องกันการซึมผ่านของน้ำ และอากาศทำให้เหล็กภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีอัตราการเกิดสนิมน้อยลง เป็นฉนวนความร้อน วัสดุปอชโซลานบางชนิด เมื่อนำไปผ่านกระบวนการเผา จะเป็นการปรับปรุงคุณภาพภายในของวัสดุ โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตโครงสร้างคุณสมบัติหลัก ๆ คือกำลังรับแรงอัด ซึ่งกำลังรับแรงอัดนี้เกิดได้จากหลายปัจจัยปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ การเกิดปฏิกิริยาเคมีซึ่งเกิดขึ้นที่ระดับจุลภาค (Microstructure) ภายในส่วนผสม

ปฏิกิริยาเคมีที่ก่อให้เกิดกำลังอัดของคอนกรีตนี้มาจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี 2 ชนิด ได้แก่ ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอชโซลาน ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาปอชโซลาน จะเกิดขึ้นต่อจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นการนำเอาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันคือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) มาเกิดปฏิกิริยากับซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ได้เป็นผลิตภัณฑ์คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CHS) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นการรับแรงอัดได้ ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอชโซลานข้างต้น เกิดได้ดีก็ต่อเมื่อซิลิกาออกไซด์ที่มีอยู่ในองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอชโซลานมีโครงสร้างอสังฐาน

จากความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอชโซลานดังที่กล่าวข้างต้นหากสามารถหาปริมาณซิลิกาอสังฐานออก จะแสดงถึงประสิทธิภาพความเป็นปอชโซลานของวัสดุ ส่งผลนำไปถึงการเลือกสรรวัสดุปอชโซลานที่มีคุณภาพสูงนำมาใช้ในงานเพื่อเกิดประโยชน์ต่อไปได้

2.2 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan)

วัสดุปอซโซลาน หมายถึง วัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกา (SiO_2) หรือ อลูมินาและซิลิกา (Al_2O_3 และ SiO_2) มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลยแต่เมื่อ บดจนกลายเป็นผงละเอียด จะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ที่อุณหภูมิปกติ และมีความชื้นเกิดเป็นสารประกอบซึ่งมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน (ASTM C 618, 2001) เมื่อ ผสมวัสดุปอซโซลานในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แล้ว จะได้ผลผลิตของปฏิกิริยาเคมีเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ที่มีการก่อตัวและแข็งตัวเช่นเดียวกับ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การผสมวัสดุปอซโซลานซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นอกจากทำให้ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติใช้งานได้ดีแล้วยังทำให้ได้คอนกรีตที่มีราคาถูกลง

หลักการทำงานของปอซโซลาน (Roles of pozzolan)

การนำวัสดุปอซโซลานมาผสมในคอนกรีต โดยทั่วไปจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติที่ดี ให้กับคอนกรีตหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณสมบัติทางด้านความทนทานของ คอนกรีต (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2547) การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตโดยปอซโซลาน นั้น กระทำได้ 2 ลักษณะ คือ

- ทางเคมี เกิดขึ้นเมื่อนำวัสดุปอซโซลานมาผสมซีเมนต์ จะทำให้ซิลิกาที่มีอยู่ จำนวนมากในปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เรียกปฏิกิริยานี้ว่า “ปฏิกิริยา ปอซโซลานิก” (Pozzolanic reaction) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งมีกำลังสูงและมี มวลมาก ส่งผลให้ปูนซีเมนต์ที่ผสมด้วย ปอซโซลานมีกำลังเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาปอซโซลานิก คือ การ ที่ซิลิกอนและหรืออลูมินาในสารปอซโซลาน ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียม ซิลิเกต (C_2S) ในกรณีที่วัสดุปอซโซลาน มีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกา ปฏิกิริยา ปอซโซลานิกสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ



และกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมินา ปฏิกิริยาปอซโซลานิก สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ



การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกคล้ายกับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้ากว่า ดังนั้น จึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ โดยเฉพาะในงานคอนกรีตหยาบ วัสดุปอซโซลานที่พบในประเทศไทยที่มีปริมาณค่อนข้างมาก และสามารถนำมาใช้งานได้ เช่น เถ้าถ่านหิน และ เถ้าแกลบ เป็นต้น

- ทางกายภาพ สารปอซโซลานมีอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้สามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างและรูพรุนขนาดต่าง ๆ กันในคอนกรีตได้ ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นและกำลังสูงขึ้นนอกจากนี้ อนุภาคที่กลมเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ความสามารถในการเทคอนกรีตผสมของปอซโซลานดีขึ้น การเปรียบเทียบคุณสมบัติของปอซโซลานต่างชนิดกันสามารถทำได้โดยการวัดค่าการเกิด Pozzolanicity (ASTM C 311, 1998) ซึ่งแสดงโดยสัดส่วนระหว่างกำลังของซีเมนต์ธรรมดาต่อกำลังของซีเมนต์ผสมด้วยปอซโซลาน

มาตรฐาน ASTM C 618 (2001) จำแนกปอซโซลาน ออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพได้แก่

ก) ชั้นคุณภาพ N (Class N) เป็นปอซโซลานจากธรรมชาติ หรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านขบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ

ข) ชั้นคุณภาพ F (Class F) เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) โดยมีปริมาณผลรวมของซิลิกาอลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่น ๆ ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ถึง 2.4 โดยทั่วไป เถ้าถ่านหินชั้นคุณภาพ F จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calciumoxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “เถ้าถ่านหินแคลเซียมต่ำ” สำหรับซิลิกาจากแร่ดินเหนียวและแร่ควอตซ์ เนื่องจากถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าถ่านหินที่มีซิลิกาสูง สำหรับวิธีการเก็บตัวอย่างและการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃) ไม่น้อยกว่าร้อยละ	70.0	70.0	50.0
ซิลเฟอไรต์รอกไซด์ (SiO ₃) ไม่นเกินร้อยละ	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น ไม่นเกินร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่นเกินร้อยละ	10.0	6.0	6.0

หมายเหตุ: 1. สารปอซโซลานชั้นคุณภาพ N เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ
 2. สามารถใช้ถ้าเกินหินที่อยู่ในชั้นคุณภาพ F ซึ่งมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูงถึงร้อยละ 12 ได้ ถ้ามีผลของการใช้งานหรือผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือ

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของปอซโซลานเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C 618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบค่าโซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O) ไม่นเกินร้อยละ	1.5	1.5	1.5

หมายเหตุ: ปริมาณนี้จะใช้ระบุสำหรับคอนกรีตที่มีมวลรวมทำปฏิกิริยาและต้องใส่ซีเมนต์ที่มีปฏิกิริยาที่มีอัลคาไลน์ไม่เกินกำหนด

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางกายภาพ ตามมาตรฐาน ASTM C 618

ข้อกำหนดทางกายภาพ	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ความละเอียด: ● ปริมาณที่ค้ำแรงเบอร์ 325 ^A ร่อนโดยใช้น้ำ ไม่เกินร้อยละ	34	34	34
ดัชนีกำลังเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์: ● ที่อายุ 7 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม ● ที่อายุ 28 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม ● ความต้องการน้ำ สูงสุดร้อยละของส่วนผสมควบคุม	75 ^B 75 ^B 115	75 ^B 75 ^B 105	75 ^B 75 ^B 105
ความคงตัว (Soundness) ^C : ● การหดตัวหรือการขยายตัวของคอนกรีต ไม่เกินร้อยละ	0.8	0.8	0.8
ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ ^D : ● ความหนาแน่น ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ ● ร้อยละที่ค้ำแรง ไม่เกิน 325 ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5 5	5 5	5 5

หมายเหตุ: A ระวังไม่ให้มีผงละเอียดที่เกาะตัวกันเป็นก้อนค้ำบนแรง

B เป็นไปตามข้อกำหนดเมื่อดัชนีกำลังที่อายุ 7 วันหรือ 28 วัน เป็นไปตามข้อกำหนด

C ถ้ามีสารปอซโซลานผสมเกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ในคอนกรีต ชิ้นส่วนทดสอบของการขยายตัวของคอนกรีต ควรมีสารปอซโซลานอยู่ ร้อยละของสารซีเมนต์ตามนั้น

D ความหนาแน่น (Density) และความละเอียดของตัวอย่างแต่ละอันต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้านี้หรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้านี้ทั้งหมด ถ้าทดสอบไม่ถึง 10 ตัวอย่าง

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C 618

ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติม	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
แฟกเตอร์ผลคูณ (Mutiple factor) ของ LOI กับปริมาณที่ค้ำแรงเบอร์ 325 เมื่อร่อน โดยใช้น้ำ ไม่เกินร้อยละ		225	
การหดตัวแห้งเมื่ออายุ 28 วันที่เพิ่มขึ้นของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ควบคุมเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างมอร์ต้าร์ควบคุมไม่เกินร้อยละ	0.3	0.3	0.3
ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ: ●เมื่อใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ปริมาณสารกักกระจายฟองอากาศ ทำให้มีปริมาตรอากาศร้อยละ 18 จะต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของ 10 ตัวอย่างหรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้าทั้งหมด ถ้าทดสอบไม่ถึง 10 ตัวอย่าง ไม่เกินร้อยละ	20	20	20
ประสิทธิภาพในการควบคุมปฏิกิริยาอัลคาไลของมวลรวม: ●การขยายตัวที่ 14 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์อัลคาไลต่ำ ไม่เกินร้อยละ	100	100	100
ประสิทธิภาพในการช่วยด้านทานสารซัลเฟต*: วิธีที่ 1 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ ●สถานะซัลเฟตปานกลาง 6 เดือน ไม่เกินร้อยละ ●สถานะซัลเฟตสูง 6 เดือน ไม่เกินร้อยละ วิธีที่ 2 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ ●เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ทนซัลเฟต ในสถานะ 6 เดือน ไม่เกินร้อยละ	0.10 0.05 100	0.10 0.05 100	0.10 0.05 100

หมายเหตุ: ปริมาณปอซโซลานที่ถือว่ามีประสิทธิภาพในการช่วยด้านซัลเฟต จะต้องอยู่ภายในร้อยละ ± 2 ของการทดสอบหรือระหว่างสองค่าของการทดสอบที่อยู่ในเกณฑ์

ก) ชั้นคุณภาพ C (Class C) ส่วนใหญ่เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผา ถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) หรือซับบิทูมินัส (Subbituminous) มีปริมาณผลรวมของซิลิกา อลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์มากกว่า 50% มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงและมีคุณสมบัติอื่น ๆ ตามที่ระบุ ในมาตรฐาน ASTM C 618 ถ่านหินชนิดนี้ เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า “เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง” สำหรับอลูมินามาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์จะประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มีอลูมินา ต่ำ ทำให้เถ้าถ่านหิน Class C นั้น นอกจากมีซิลิกาต่ำแล้ว ยังมีอลูมินาต่ำด้วย (ACI 232.2R-96, 2000)

วัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีที่มาจาก 2 แหล่ง ได้แก่ ปอซโซลานจากธรรมชาติ (Natural pozzolan) และปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต (Artificial pozzolan) ปอซโซลานที่มาจากธรรมชาติ ได้แก่ ไดอะตอมมาเซียสอิธ (Diatomaceous earth) เถ้าภูเขาไฟเปลือกหอย และหินภูเขาไฟ เมื่อนำไปใช้งาน ต้องนำไปผ่านกระบวนการต่าง ๆ ก่อน เช่น การเผา การบด และการทำให้แห้ง เป็นต้น จึงจะนำไปใช้งานได้ ปัจจุบันได้มีการนำเอาปอซโซลานจากธรรมชาติ ไปใช้ประโยชน์ในการสร้างเขื่อนและสะพานเพื่อช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาของ ปูนซีเมนต์กับน้ำ ช่วยเพิ่มความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตและช่วยควบคุม ปฏิกิริยาระหว่างต่างกับซิลิกา นอกจากนี้ ยังมีสามารถลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอีกทางหนึ่งด้วย

ปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต ได้แก่ เถ้าลอยที่เป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ ถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “เถ้าถ่านหิน” ประกอบด้วยอนุภาคทรงกลมมี ซิลิกาเป็นส่วนประกอบสำคัญประมาณ 66% ถึง 68% เถ้าถ่านหินบางชนิดสามารถทำปฏิกิริยากับ ปูนขาวและค้างได้อย่างรวดเร็ว เกิดเป็นสารประกอบที่มีแรงยึดประสาน บางชนิดสามารถทำ ปฏิกิริยากับน้ำและแข็งตัวได้ โดยทั่วไปเถ้าถ่านหินมีความละเอียดใกล้เคียงหรือสูงกว่า ปูนซีเมนต์ เล็กน้อย ลักษณะทั่วไปเป็นรูปทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็ก กว่า 1 μm ถึง 0.15 mm

การวัดความละเอียดของเถ้าถ่านหินมี 2 วิธีที่นิยมใช้กัน คือ วิธีการร่อนผ่านร่ง เบอร์ 325 (ช่องเปิด 45 μm) กับวิธีวัดพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักโดยวิธีของเบลน ในสหรัฐอเมริกาใช้ วิธีร่อนผ่านร่งเป็นวิธีมาตรฐานวิธีเดียวในการกำหนดความละเอียดของเถ้าถ่านหิน คือ เถ้าถ่านหิน ต้องมีขนาดของอนุภาคที่ร่อนผ่านกระแกรงเบอร์ 325 ไม่น้อยกว่า 66% โดยน้ำหนัก เถ้าถ่านหินที่ ละเอียดขึ้นจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น และทำให้กำลังอัดคอนกรีตสูงกว่า คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถวัดได้โดย ใช้ค่าดัชนีกำลัง (Strength activity index) ดังสมการดังนี้

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

โดยที่ A คือ กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหิน 20%

B คือ กำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานซึ่งไม่มีเถ้าถ่านหินในส่วนผสม

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

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ หลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันซิลิกาและอลูมินาที่อยู่ในเถ้าถ่านหินจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต สารประกอบทั้งสองมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้น และเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุระหว่าง 7 ถึง 14 วัน และมีปฏิกิริยาไปเรื่อย ๆ (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2547)

2.3 ปอซโซลานธรรมชาติ (Natural pozzolan)

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

ในตอนต้นศตวรรษที่ 20 มีการนำวัสดุปอซโซลานธรรมชาติมาใช้ในแถบอเมริกาเหนือเพื่อใช้ในโครงการก่อสร้างสาธารณูปโภค เช่น การสร้างเขื่อน ซึ่งการใช้วัสดุปอซโซลานนั้นเพื่อควบคุมอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตขนาดใหญ่และเป็นการเพิ่มปริมาณวัสดุซีเมนต์ นอกจากนี้เพื่อควบคุมความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นแล้ว ยังสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อช่วยเพิ่มความต้านทานต่อซัลเฟต วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุชนิดแรกที่พบว่าลดการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลน์ซิลิกาในคอนกรีต

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของเถ้าลอยและปอซโซลานธรรมชาติ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008)

ชั้นคุณภาพ (Class)	คุณภาพของเถ้าลอย
F	มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานนิค
N	มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานนิค และวัสดุประสานในซีเมนต์
C	ปอซโซลานธรรมชาติที่ถูกต้องหรือมีลักษณะหยาบ ประกอบด้วย:
	● Diatomite
	● Opaline Cherts และ ดินดาน
	● Tuffs และ เถ้าภูเขาไฟ หรือพิมิไซท์
	● ดินเผา รวมทั้งดินขาวและดินดาน

ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานธรรมชาติส่วนใหญ่ผ่านการปรับปรุง เช่น กระบวนการให้ความร้อนในเตาเผาและบดเป็นผงละเอียด ซึ่งอาจเป็นดินเผา (Calcined clay) ดินดานเผา (Calcined shale) และดินขาวเผา (Metakaolin) ซึ่งดินขาวที่กล่าวถึงนี้เป็นดินเผาพิเศษ ผลิตโดยเอาดินเหนียวขาวล้างมาเผาที่อุณหภูมิต่ำ หลังจากนั้นจึงบดจนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 1 ถึง 2 μm ดินขาวสามารถนำมาใช้ในงานที่ต้องการความซึมผ่านที่ต่ำ หรือต้องการกำลังที่สูง ดินขาวได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตมากกว่านำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยทั่วไปจะใส่เพิ่มในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

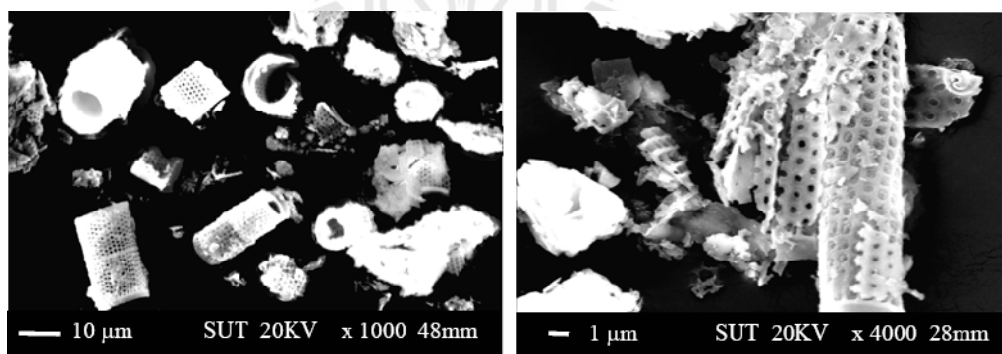
วัสดุปอซโซลานจากธรรมชาติถูกจำแนกโดยมาตรฐาน ASTM C 618 (2008) โดยจำแนกเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ดังแสดงในตาราง 2.4 ซึ่งได้กำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ

Pekmezci และ Akyz (2004) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณปอซโซลานธรรมชาติที่มีต่อคอนกรีตทำศึกษาโดยการทดสอบคอนกรีตทั้งหมด 15 ส่วนผสม โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตควบคุมที่มีปริมาณซีเมนต์ 300 350 และ 400 kg/m^3 และได้ดัดแปลงส่วนผสมเพื่อศึกษาเปรียบเทียบโดยลดปริมาณซีเมนต์ลงเป็น 250 300 และ 350 kg/m^3 คอนกรีตควบคุม และได้เพิ่มปริมาณปอซโซลานธรรมชาติเข้าไปแทนที่ปูนซีเมนต์ 40 50 75 และ 100 kg/m^3 ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณสารปอซโซลานธรรมชาติที่มากขึ้นไปส่งผลทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตลดต่ำลง ดังนั้นจึงควรใช้ในปริมาณที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตที่สูงที่สุดและ Pekmezci (2004) ยังพบอีกว่าในกรณีที่ลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม แล้วแทนที่ด้วยปอซโซลานธรรมชาตินั้น ส่งผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง เนื่องจากปอซโซลาน

ธรรมชาติไม่มีคุณสมบัติในการเป็นสารซีเมนต์ (Cementitious material) และเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าปอซโซลานธรรมชาติจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งเกิดจากผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยที่อัตราส่วนระหว่างปอซโซลานต่อซีเมนต์ (Pozzolan/Cement ratio, P/C) ที่ 0.28 เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ได้คอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด

2.4 ไดอะตอมไมท์ (Diatomite)

ไดอะตอมไมท์คือชื่อเรียกทางวิทยาแร่ของดินเบา (Diatomaceous earth) หรือดินไดอะตอม คือ ดินซึ่งเกิดจากการทับถมของซากไดอะตอม ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวขนาดเล็กมาก ตั้งแต่ 2 ถึง 2000 μm มีผนังเป็นซิลิกาประกบกัน ไดอะตอมพบได้ในแหล่งน้ำทั่วโลกทั้งน้ำจืด น้ำกร่อยและน้ำเค็ม มีอยู่ประมาณ 12000 ถึง 16000 ชนิด บางชนิดว่ายน้ำได้ แต่บางชนิดต้องอาศัยกระแสน้ำพัดพาไป เมื่อตายลงเปลือกที่เป็นซิลิกาจะตกตะกอนทับถมกันเป็นจำนวนมาก จนเกิดเป็นแหล่งของไดอะตอม ลักษณะของไดอะตอมไมท์แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ภาพขยายของไดอะตอมไมท์ (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)

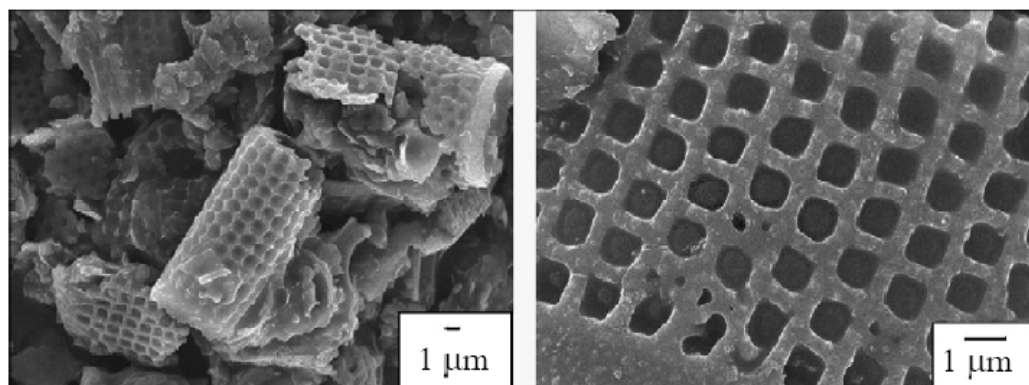
ดินเบา มีโครงสร้างประกอบด้วยโพรงเล็ก ๆ อยู่ทั่วไป มีเนื้อหยาบพรุนคล้ายขอล็กและมีปริมาณซิลิกาสูงถึงประมาณ 85% ขึ้นไป ในประเทศไทยพบมากแถบจังหวัดลำปาง ในทวีปแอฟริกาตอนเหนือ พบที่เมืองทริโปลี ในประเทศเยอรมนี เมืองฮาโนเวอร์และในแถบสหรัฐอเมริกา มีการผลิตดินเบาจำนวนมากในมลรัฐ โอเรกอน แคลิฟอร์เนีย วอชิงตัน ไอดาโฮและเนวาดา เป็นต้น

ในการผลิตดินเบาจากแหล่งไคอะตอมจะถูกนำมาบดและเผาให้เป็นเถ้า โดยจะมีความละเอียด และความบริสุทธิ์แตกต่างกันไป ดินเบาที่บริสุทธิ์จะมีสีขาวแต่ถ้ามีสิ่งเจือปนจะมีสีเทาหรือสีออกน้ำตาลหรือเขียว มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 192 ถึง 272 kg/m³ มีปฏิกิริยาทางเคมีเชิงซ้่า และเป็นตัวนำความร้อนได้ไม่ดี

ดินเบาใช้ประโยชน์ได้หลายอย่างดังนี้

- ใช้เป็นสารขัดถู (Abrasive) สำหรับขัดภาชนะโลหะได้ดี เพราะมีซิลิกาขนาดละเอียดปนอยู่
- ใช้ในการกรอง (Filtering) เช่น กรองน้ำตาลและสารอื่น ๆ เป็นต้น แท่งดินเบา (Diatomite block) จะมีความพรุนสูงถึง 90% ของปริมาตรแท่ง จึงมีคุณสมบัติในการกรองได้ดี
- ใช้เป็นตัวเติม (Filler) ในการผลิตสีและการขึ้นรูปพลาสติก
- ใช้เป็นส่วนผสมในการทำกระดาษเพื่อให้เนื้อกระดาษแน่นเนียน เช่น ในการทำกระดาษสา เป็นต้น
- ใช้เป็นฉนวน โดยนำมาอัดเป็นก้อน (Block) หรือเป็นแผ่นสามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 371°C และบางชนิดเมื่อนำมาสร้างพันระกับใยหิน (Asbestos) จะทนอุณหภูมิได้สูงถึง 1038°C
- ใช้เป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สำหรับใช้ในงานประเภทที่ต้องอาศัยความละเอียดและใช้กันน้ำ
- ใช้แทนซิลิกาในน้ำเฝ้าเคลือบเครื่องปั้นดินเผา

Kedsarin Pimraksa และ Prinya Chindaprasirt (2008) ได้ศึกษาคุณสมบัติของอิฐมวลเบาที่มีไคอะตอมไม่ท้จากแหล่งลำปาง (ซึ่งมีปริมาณมากถึง 100 ล้านตัน) ปูนขาวและยิปซัมเป็นส่วนผสมพบว่าไคอะตอมไม่ท้จากแหล่งลำปางมีคุณสมบัติในการเป็นสารปอชโซลานและสามารถนำมาทำอิฐมวลเบาได้เนื่องจากมีซิลิกาและอลูมินาสูง มีความพรุนสูง เช่นเดียวกับสารปอชโซลานธรรมชาติทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และตารางที่ 2.6



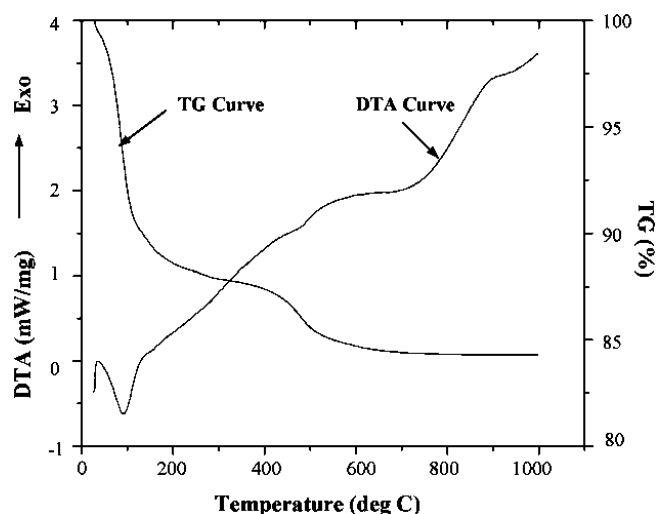
รูปที่ 2.2 ภาพถ่าย SEM ของไออะตอมไมท์จากแหล่งลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008)

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของไออะตอมไมท์จากแหล่งลำปาง

(Kedsarin Pimraksa, 2008)

ออกไซด์	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃
ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)	77.5	14.2	5.2	2.1	0.2	0.0	0.5	0.5	0.3	0.0

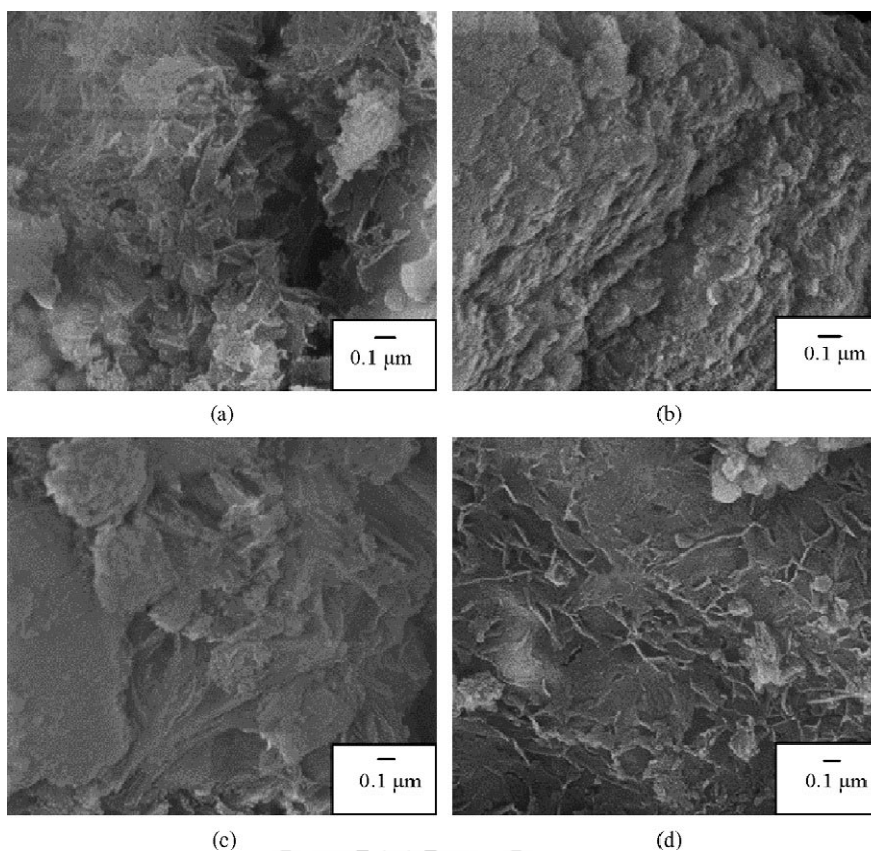
จากตารางที่ 2.6 ปริมาณของออกไซด์หลักได้แก่ SiO₂ Al₂O₃ และ Fe₂O₃ มีค่า 77.5 14.6 และ 5.24% ตามลำดับ จัดเป็นปอซโซลานธรรมชาติ Class N ตามการจำแนกตามมาตรฐาน ASTM C 618 และจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) จะเห็นอนุภาคที่มีลักษณะแบบทรงกระบอก ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d₅₀) ประมาณ 32 μm ผนังเป็นตารางคล้ายรังผึ้ง ขนาดช่องประมาณ 1 μm มีพื้นที่ผิวที่สูงถึง 17000 m²/kg ซึ่งทำให้ไออะตอมไมท์มีน้ำหนักเบาและมีความพรุนสูงจากกราฟ Differential thermal analysis (DTA) และ Thermal gravity analysis (TGA) แสดงในรูปที่ 2.3 ไออะตอมไมท์จากแหล่งลำปางที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500°C มีน้ำหนักที่เบาลง มีค่าการสูญเสียน้ำหนักในช่วง 450 ถึง 500°C และจะค่อย ๆ คงที่เมื่ออุณหภูมิเกินกว่า 500°C โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.7



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

ในการศึกษาได้นำไคอะตอมไมท์มาผสมกับปูนขาว 15% และยิปซัม 5% เตรียมแบบหล่อตัวอย่างขนาด 3.5X7.5X15 cm ใช้เครื่องอัดเข้าแบบที่มีแรงกดอัดประมาณ 35 ksc นำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องระหว่าง 27 ถึง 28°C โดยแปรผันระยะเวลาการบ่มที่ 3 5 6 7 และ 11 วัน บ่มด้วยตู้อบไอน้ำความดันสูง (Autoclave) ที่ความดันประมาณ 0.14 MPa และอุณหภูมิ 130°C ต่อไปอีก 4 ชั่วโมง พบว่าส่วนผสมที่มีปริมาณความชื้น 50% ได้ค่ากำลังอัดสูงสุด 147.8 ksc มีหน่วยน้ำหนัก 1020 kg/m³ ที่อายุการบ่ม 6 วัน แต่เมื่อวิเคราะห์ปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่านี้จะให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำลง

เมื่อพิจารณาค่ากำลังอัดและจากภาพถ่าย SEM ของอิฐที่ทำการแปรผันอุณหภูมิในการเผาไคอะตอมไมท์ ที่อุณหภูมิ 0 200 350 500 และ 700°C ดังที่แสดงในรูปที่ 2.4 พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาไคอะตอมไมท์ ที่สามารถทำให้ได้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด คือที่อุณหภูมิ 500°C ได้ค่ากำลังอัด 178.4 ksc หน่วยน้ำหนัก 730 kg/m³ มีโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ดีที่สุด อย่างไรก็ตามในการทำอิฐที่มีส่วนผสมของไคอะตอมไมท์ที่ไม่ได้ผ่านการเผา ก็สามารถทำได้ โดยมีค่ากำลังอัดประมาณ 147.8 ksc และมีหน่วยน้ำหนัก 880 kg/m³ ดังแสดงในตารางที่ 2.9



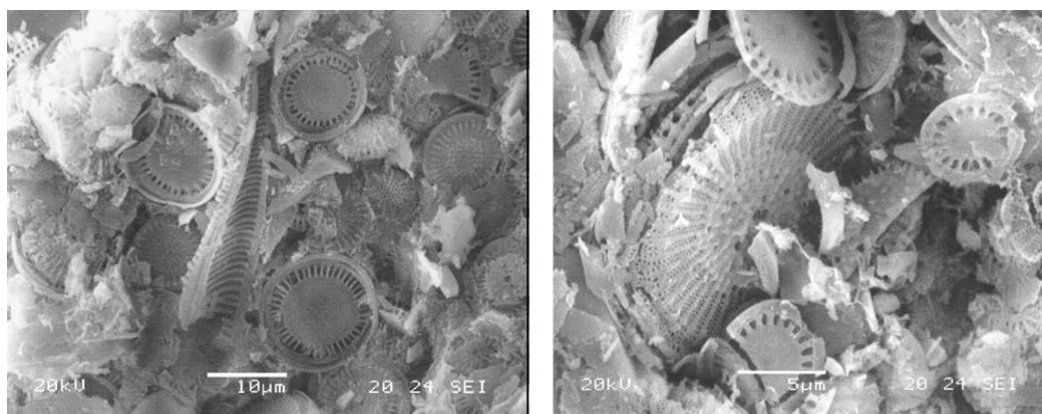
รูปที่ 2.4 ภาพถ่าย SEM ของอิฐที่ทำการแปรผันอุณหภูมิในการเผาโคลอะตอมไมท์ (a) 200°C (b) 350°C (c) 500°C และ (d) 700°C (Kedsarin Pimraksa, 2008)

จากการทดสอบ X-ray fluorescence ของโคลอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ เยอรมัน และ เดนมาร์ก แสดงในตารางที่ 2.10 พบว่ามีปริมาณออกไซด์หลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกัน มากกว่า 70% โดยน้ำหนัก มีค่า LOI ไม่มากกว่า 10% ซึ่งค่า LOI ที่สูญเสียไปนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียน้ำเนื่องจากการเผา เหตุผลเพราะโคลอะตอมไมท์เกิดขึ้นจากการทับถมเป็นเวลานานจึงมีส่วนประกอบของดินเหนียวปะปนอยู่ รวมทั้งผนังเซลล์ของโคลอะตอมที่ประกอบด้วยซิลิกาที่มีปริมาณน้ำปะปนอยู่ด้วย และจะมีปริมาณมากหรือน้อยนั้นจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของผนังเซลล์

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของไคอะตอมไมท์ประเทศกรีซ เยอรมัน และเดนมาร์ก
(Fragoulisa , 2004)

ปริมาณออกไซด์ (%)	กรีซ	เยอรมัน	เดนมาร์ก
Na ₂ O	1.5	1.3	0.2
K ₂ O	2.2	3.6	2.4
CaO	3.2	1.5	6.5
MgO	1.8	1.5	4.5
MnO	-	-	-
Fe ₂ O ₃	12.3	22.2	32.9
TiO ₂	-	-	2.2
Al ₂ O ₃	18.2	26.2	15.4
SiO ₂	60.8	44.1	35.8
P ₂ O ₅	-	-	-
LOI	7.4	-	-
Total	100.1	100.3	99.9

จากภาพถ่ายไคอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) พบว่ารูปแบบของผนังเซลล์ที่ประกอบด้วยซิลิกาที่ค่อนข้างสมบูรณ์ มีลักษณะทรงกระบอก แบบจาน มีขนาดอยู่ระหว่าง 5 ถึง 30 μm แสดงในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ (Fragoulisa et al., 2004)

ตัวอย่าง LWAs ของประเทศกรีซ ที่ผ่านการเผาแล้วส่วนใหญ่จะยังคงรูปร่างเป็นทรงกลม เช่นเดิม มีสีน้ำตาลแดง เป็นเนื้อเดียวกันทั้งก้อน แต่มีบางก้อนที่มีลักษณะคล้ายหัวกะหล่ำปลี จากการเผาทำให้ Pellets บางก้อนขยายตัวเป็นรูเล็กๆ หรือมีรอยแยกเล็กๆ ที่ผิว จากผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัดและความหนาแน่น พบว่า มีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกับ LWAs ของประเทศเยอรมันและเดนมาร์ก แต่ในอัตราส่วนที่ใช้ไคอะตอมไมท์ 20 kg ขึ้น้อยคิด 5% อัตราส่วน w/s น้อยกว่า 0.5 สามารถรับแรงอัดได้ 2029 g มีค่าความหนาแน่น 0.9 g/cm³ ค่าความหนาแน่นที่ได้จะสูงกว่าและสามารถรับกำลังอัดได้ดีกว่า LWAs ของประเทศเยอรมันและเดนมาร์ก คือ LWAs ของประเทศเดนมาร์กและเยอรมัน สามารถรับแรงได้เพียง 986 g และ 580 g ตามลำดับ มีความหนาแน่น 0.7g/cm³ และ 0.7g/cm³ 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) ทำให้ทราบว่าไคอะตอมไมท์ในแต่ละแหล่งจะมีปริมาณออกไซด์หลักและรูปร่างแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับระยะเวลาการทับถม แหล่งกำเนิด และชนิดของ ไคอะตอม ดังนั้น ในการศึกษาควรคำนึงถึงทั้งลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของ ไคอะตอมไมท์ในแต่ละแหล่งกำเนิด รวมถึงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติที่ดีของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

Aydin และ Gul (2007) ได้ศึกษาผลกระทบของระยะเวลาการก่อตัวและคุณสมบัติเชิงกลบางประการของคอนกรีตที่เกิดจากการนำวัสดุธรรมชาติที่ได้จากการระเบิดของภูเขาไฟมาใช้ในส่วนผสม โดยใช้ไคอะตอมไมท์จากประเทศตุรกีแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ปริมาณ 1 2 และ 4% โดยควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ 300 kg/m³ ค่ายุบตัวเฉลี่ย 5 cm ทำการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของไคอะตอมไมท์เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แสดงในตารางที่ 2.7 พบว่าไคอะตอมไมท์ที่มีปริมาณสารประกอบหลัก SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เมื่อรวมกันแล้วมีค่ามากกว่า 70% โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติในการเป็นวัสดุพอโซโซลาน

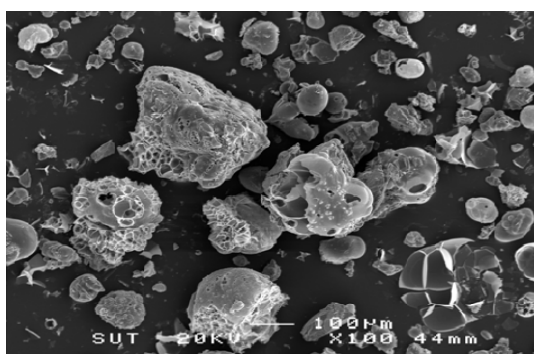
ตารางที่ 2.8 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของไคอะตอมไมท์ประเทศตุรกีกับปูนซีเมนต์

(Aydin และ Gul, 2007)

ออกไซด์	ปูนซีเมนต์ (%)	ไคอะตอมไมท์ (%)
SiO ₂	17.7	77.1
Al ₂ O ₃	3.6	1.6
Fe ₂ O ₃	5.9	3.9
CaO	57.7	2.0
MgO	3.4	1.2
SO ₃	2.6	-
K ₂ O	0.3	-
TiO ₂	0.2	-
LOI	2.5	4.4

2.5 เพอร์ไลต์ (Perlite)

เพอร์ไลต์ เป็นหินภูเขาไฟเนื้อแก้วและรวมทั้งสิ่งที่เกิดจากการขยายตัวของหินภูเขาไฟเนื้อแก้ว เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมในเวลาอย่างรวดเร็ว จะขยายตัวออกไปได้ตั้งแต่ 4 ถึง 20 เท่าของปริมาตรเดิม ทำให้เปลี่ยนสภาพเป็นสารที่มีน้ำหนักเบา มีความพรุนสูงและมีลักษณะคล้ายหินพูนิช สารที่ได้จากการขยายตัวของหินเพอร์ไลต์นี้ เรียกว่า “เพอร์ไลต์” (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546) แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ภาพขยายของเพอร์ไลต์ (ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550)

2.5.1 ลักษณะการเกิดของหินเพอร์ไลต์

เพอร์ไลต์ จัดอยู่ในประเภทหินอัคนีพุ (Effusive rock) มีเนื้อละเอียดเป็นแก้ว เนื่องจากเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของหินหนืด เป็นแร่องค์ประกอบร่วมกับหินไรโอไลต์ที่เกิดในระดับต้นและมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว บริเวณที่พบในประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดกาญจนบุรี และพบมากที่จังหวัดลพบุรี โดยเฉพาะที่อำเภอสระโบสถ์ มีปริมาณแร่เพอร์ไลต์ประมาณ 1 ล้านเมตริกตัน ประโยชน์ของแร่เพอร์ไลต์ คือ ใช้เป็นส่วนผสมวัสดุก่อสร้างน้ำหนักเบาและเป็นส่วนเติมเต็มในอุตสาหกรรมปุ๋ยและอุตสาหกรรมสี (ณรงค์ศักดิ์ นันทคำภีราและคณะ, ออนไลน์, 2547)

หินเพอร์ไลต์เกิดเป็น Effusive rock แทรกเข้ามาในชั้น Pumicious tuffs ซึ่งเข้าใจว่าจะมีน้ำอยู่ในรูปพูนค่อนข้างมาก ภายหลังจากที่แมกมาแทรกเข้ามาและเย็นตัวเป็นแก้วภูเขาไฟแล้ว น้ำที่อยู่ในชั้น Tuff จะค่อยๆ แทรกซึมลงไปรวมกับแก้วภูเขาไฟ ซึ่งแต่เดิมมีน้ำอยู่เพียงร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 2 กลับเพิ่มมากขึ้นเป็นร้อยละ 3 ถึงร้อยละ 5 พร้อมๆ กับเกิดการขยายตัวและแตกเป็นรูปเปลือกของหัวหอม (Peritic crack) ขึ้น สำหรับ Pumicious perlite มีลักษณะการเกิด ที่แสดงให้เห็นถึงการถูกความกดดันและการระเหยหนีไปของ Volatile ที่ละลายปนอยู่ในแมกมาขณะเคลื่อนที่ตัวขึ้นมาใกล้ผิวโลก ด้วยขณะที่เกิดเป็นของเหลวอยู่ แรงดันและแรงระเหยหนีของ Volatile ผ่านช่องว่างที่มีอยู่อย่างจำกัด จึงเกิดการรีดเป็นเส้นใยแก้วที่มีรูปพูนสูง แล้วจึงดูดซับน้ำเข้าไปในเนื้อ ซึ่งเชื่อว่าเป็นปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การขยายตัวของเพอร์ไลต์ชนิดนี้จึงค่อนข้างต่ำ แล้วภูเขาไฟมีลักษณะใสไม่สามารถคงตัวอยู่ได้นานๆ อาจเป็นเพราะแรงกดดันเนื่องจากมีน้ำหนักหินปิดทับและมีน้ำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาบางส่วนของแก้วจึงเปลี่ยนเป็น Feldspar และ Quartz ขนาดเล็กๆ อยู่ด้วยกัน และมักจะมีสีแดงเรียกว่า Devitrified glass หรือ Spherulite (กรมทรัพยากรธรณี, ออนไลน์, 2548)

2.5.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของหินเพอร์ไลต์

หินเพอร์ไลต์ส่วนใหญ่เนื้อหินมีลักษณะเป็นแก้ว มักจะมีรอยแตกเป็นวงๆ ซ้อนกัน คล้ายกลีบหัวหอม รอยแตกนี้อาจจะมองเห็นด้วยตาเปล่าหรืออาจจะต้องอาศัยดูด้วยแว่นขยายหรือใช้กล้องจุลทรรศน์ โดยทั่วไปจะมีสีเทาอ่อนแต่อาจจะพบสีดำ สีน้ำตาล หรือสีเขียวได้และในเนื้อหินมักจะมีผลึกแร่ควอตซ์ แร่เฟลด์สปาร์ แร่ไบโอไทต์ แร่ฮอร์นเบลนด์ และมีชิ้นส่วนของเศษหินชนิดอื่นฝังตัวอยู่ ความแข็งตามมาตรฐานของโมห์ (Moh's scale) อยู่ระหว่าง 5.5 ถึง 7.0 มีความถ่วงจำเพาะ 2.3 ถึง 2.8 จุดหลอมตัวที่อุณหภูมิ 760 ถึง 1300°C และค่าดัชนีหักเหแสง 1.49 ถึง 1.61

ตารางที่ 2.9 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยเพอร์ไลต์กับปูนซีเมนต์ผสมแบบธรรมดา (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)

Type	Air dry unit volume weight (kg/l)	Thermal conductivity (Kcal/mh°C)
คอนกรีตผสมเพอร์ไลต์	1.20 – 1.60	0.27 – 0.36
ปูนผสมทราย	2.01	1.24

2.5.3 คุณสมบัติทางเคมีของหินเพอร์ไลต์

หินเพอร์ไลต์เป็นหินภูเขาไฟเนื้อแก้ว ที่มีส่วนประกอบของออกไซด์ของธาตุซิลิกาค่อนข้างสูงประมาณ 70% หรือมากกว่า มีน้ำเป็นส่วนประกอบประมาณ 2 ถึง 5% ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารเคมีอื่นๆ ได้ง่ายนัก จัดอยู่ในจำพวกสารเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมีเนื้อแก้วของหินเพอร์ไลต์จะมีการเปลี่ยนสภาพแก้วเป็นผลึก (Diversification) เมื่ออายุของหินเพอร์ไลต์มากขึ้น ดังนั้น หินเพอร์ไลต์ที่จะมีคุณภาพดีและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้นั้นเนื้อแก้วจะต้องไม่เปลี่ยนสภาพแก้วเป็นผลึก ซึ่งจะพบได้ในหินภูเขาไฟยุคใหม่ประมาณยุคเทอร์เชียรีขึ้นมา หรือน้อยกว่า 65 ล้านปี

เพอร์ไลต์ มีองค์ประกอบหลักทางเคมีคล้ายคลึงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และโคอะตอมไมท์ ส่วนประกอบทางเคมีของหินเพอร์ไลต์จะอยู่ในรูปของออกไซด์ของธาตุต่างๆ ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 2.10 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยของหินเพอร์ไลต์ทั่วโลกกับประเทศไทย จากการสำรวจของสำนักเหมืองแร่และสัมปทาน เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นทางสถิติในการศึกษาเพื่อพัฒนาการใช้เพอร์ไลต์ในงานอุตสาหกรรม (สำนักงานเหมืองแร่และสัมปทาน, 2546)

ตารางที่ 2.10 องค์ประกอบทางเคมีของหินเพอร์ไลต์ (สำนักงานเหมืองแร่และสัมปทานออนไลน์, 2546)

องค์ประกอบเคมี	ค่าเฉลี่ยหินเพอร์ไลต์	
	ทั่วโลก	ประเทศไทย
SiO ₂	71.0 – 75.0	71.02
Al ₂ O ₃	12.5 – 18.0	16.09
Fe ₂ O ₃	0.50 – 1.50	0.71
FeO	0.00 – 0.10	0.73

ตารางที่ 2.10 องค์ประกอบทางเคมีของหินเพอร์ไลต์ (สำนักงานเหมืองแร่และสัมปทาน
ออนไลน์, 2546) (ต่อ)

องค์ประกอบเคมี	ค่าเฉลี่ยหินเพอร์ไลต์	
	ทั่วโลก	ประเทศไทย
MgO	0.10 – 0.50	0.41
CaO	0.50 – 2.00	0.58
Na ₂ O	2.90 – 4.00	0.90
K ₂ O	4.00 – 5.00	5.59
H ₂ O (Comb)	3.00 – 5.00	3.57

2.5.4 การใช้ประโยชน์

เพอร์ไลต์สามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้หลายอย่าง ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมี ส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในงานด้านก่อสร้างเพื่อประโยชน์ในการลดน้ำหนักของสิ่งก่อสร้าง เป็นฉนวนป้องกันความร้อนและความเย็น ใช้เป็นผนังป้องกันเสียงได้ นอกจากนี้ได้มีการนำไปใช้ในงานด้านต่างๆ ทั้งงานด้านเกษตรและงานด้านอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้แก่

- ด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้าง

มีการนำเพอร์ไลต์มาใช้ในด้านอุตสาหกรรมก่อสร้างประมาณ 70% ของปริมาณที่ผลิตได้ทั่วโลก เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ มีความพรุนสูงและทนไฟ ด้วยคุณสมบัติเด่นดังกล่าว เพอร์ไลต์จึงนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น ฝ้าเพดาน

เนื่องจากเพอร์ไลต์เป็นส่วนประกอบของฝ้าเพดาน และผลิตภัณฑ์ยิปซัมแผ่นเรียบบางชนิดเพอร์ไลต์เป็นส่วนผสมที่ทำให้กระเบื้องไม่เป็นตัวนำความร้อน คลื่นเสียงผ่านทะลุไม่ได้ มีความหนาแน่นต่ำ และเป็นวัสดุทนไฟ เมื่อนำไปผสมกับปูนซีเมนต์ จะทำให้ได้คุณภาพที่ดีกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา เมื่อนำไปฉาบผนังตึกหรือเพดานจะทำให้ปูนสามารถยึดติดผนังได้ดี แข็งเร็วและไม่เกิดรอยร้าว เนื่องจากมีความยืดหยุ่นได้ดี

นอกจากนี้เมื่อนำเพอร์ไลต์ไปผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในกระบวนการผลิตคอนกรีตใช้ในงานก่อสร้างต่างๆ ทำให้ลดน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างนั้นลงได้ และยังทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนและป้องกันการสะท้อนของเสียงได้เป็นอย่างดี คอนกรีตที่ใช้เพอร์ไลต์ผสมจะมีความหนาแน่นต่ำถึง 320 kg/m^3 และถ้ามีความหนาแน่นประมาณ 2 in จะมีประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนได้เท่ากับแผ่นฉนวนมาตรฐาน แต่มีความแข็งแรงและคงทนกว่าแผ่นฉนวนมาตรฐานมาก ซึ่งได้มีการทดลองและเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยเพอร์ไลต์กับปูนซีเมนต์ผสมแบบธรรมดาโดยบริษัทผลิตเพอร์ไลต์ของประเทศไทย

2.5.5 แหล่งเพอร์ไลต์ในประเทศไทย

แหล่งเพอร์ไลต์พบอยู่ในบริเวณกลุ่มหินภูเขาไฟตอนกลางของประเทศ ซึ่งจัดอยู่ในหน่วยหินภูเขาไฟล้านนารายณ์ (นิคม จึงอยู่สุขและปัญญา สุริยะฉาย, 2530) ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 1,200 ตารางกิโลเมตร อยู่ในเขตจังหวัดลพบุรีและจังหวัดเพชรบูรณ์ หน่วยหินภูเขาไฟล้านนารายณ์ประกอบด้วยหินภูเขาไฟชนิดต่างๆ ตั้งแต่ บะซอลต์ แอนดีไซต์ ไปจนถึงไรโอไลต์

เพอร์ไลต์เกิดร่วมกับไรโอไลต์ และหินเถ้าถ่านภูเขาไฟ (Ash-flow tuffs) โดยเกิดลักษณะแบบลาวา และเกิดแบบพ่นัง โผล่ให้เห็นเป็นชั้นหนาตามบริเวณของภูเขาไฟล้านนารายณ์ โดยเฉพาะขอบด้านตะวันตก เพอร์ไลต์ที่พบมีสีดำ น้ำตาล เขียวเข้ม หรือเขียวอ่อน มีลักษณะเนื้อเป็นแก้ว และมีผลึกของเฟลด์สปาร์ ประมาณ 2 ถึง 10% และผลึกของไบโอไทต์ ประมาณ 1 ถึง 2% ชั้นของเพอร์ไลต์ที่โผล่มีความหนาตั้งแต่ 1 ถึง 20 m วางตัวค่อนข้างราบ และส่วนมากจะวางตัวอยู่บนหินเถ้าถ่านภูเขาไฟ และถูกปิดทับด้วยไรโอไลต์

2.5.6 สถานการณ์เพอร์ไลต์ของประเทศไทย

ในปัจจุบันเพอร์ไลต์มีการผลิตจากประทานบัตรของ ห้างหุ้นส่วนจำกัดคลองยาง จำนวน 1 แปลง เพียงแหล่งเดียว ตั้งอยู่ที่ตำบลมหาโพธิ์ อำเภอสระโบสถ์ จังหวัดลพบุรี มีอัตราการผลิตประมาณ 2,400 ตันต่อปี สำหรับแร่เกรดสูงที่เผ่าสำหรับทำวัสดุรองคุณภาพสูงจะถูกจำหน่ายให้กับโรงงานน้ำผลไม้ การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Hydroponic) ตัวเติมสำหรับปูนฉาบสำเร็จ และอิฐทนไฟ โดยจำหน่ายให้กับโรงเผาที่จังหวัดราชบุรี ราคาของเพอร์ไลต์คุณภาพสูงก่อนการเผาที่ 650 บาทต่อตัน เมื่อเผาแล้วราคาจะเพิ่มขึ้นเป็น 6,000 ถึง 12,000 บาทต่อตัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติความขาว และความหนาแน่น (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)

คม บัวคลี่และรังสรรค์ รังสิมาวงศ์ (2540) ได้ทำการศึกษาเพื่อหาสัดส่วนการผสมมอร์ต้าร์มวลเบา โดยการใช้เพอร์ไลต์มาแทนที่ทรายบางส่วน เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ และสามารถนำมอร์ต้าร์มวลเบาไปใช้งานได้จริงในการผลิตผนังมวลเบา โดยในการทดลองได้ใช้ทั้งขนาดหยาบและขนาดละเอียดปนกัน เพอร์ไลต์ในการทดสอบมีหน่วยน้ำหนักประมาณ 252 kg/m^3 การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์นั้น แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ การทดสอบหน่วยน้ำหนัก การทดสอบความสามารถเทได้โดยใช้โตะการไหลและการทดสอบกำลังอัด โดยกำหนดเป้าหมาย คือด้านหน่วยน้ำหนักไม่เกิน 800 kg/m^3 ค่าการไหลแผ่ควรมากกว่า 70% และกำลังอัดควรมีมากกว่า 35 ksc ที่อายุ 7 วัน ผลการวิจัยพบว่าหน่วยน้ำหนักจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเพอร์ไลต์ที่ใช้แทนที่ทรายและปริมาณช่องว่างอากาศที่แทรกในเนื้อมอร์ต้าร์ โดยปริมาณเพอร์ไลต์ที่เหมาะสมที่สุด คือ แทนที่ทราย 90% โดยปริมาตร ด้านการไหลขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในเพอร์ไลต์เป็นหลักกล่าวคือการไหลจะดีเมื่อปริมาณความชื้นในเพอร์ไลต์อยู่ระหว่าง 90 ถึง 100% ส่วนด้านกำลังอัด พบว่ามอร์ต้าร์ที่ใส่ทั้งสารกระจายกักฟองอากาศและสารลดน้ำอย่างมากมีคุณสมบัติตรงตามเป้าหมายคือ ค่ากำลังอัด 37 ksc ที่อายุการบ่ม 7 วัน คุณสมบัติด้านหน่วยน้ำหนักและความสามารถเทได้นั้นขึ้นกับปัจจัยหลายประการ แต่ที่ควรระมัดระวังเป็นพิเศษคือปริมาณความชื้นในเพอร์ไลต์และขนาดของเพอร์ไลต์ที่ใช้ในการผสม

จิตรกร ตังอนุสรณ์สุข และคณะ (2548) ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเพอร์ไลต์ที่มีอยู่ในประเทศไทย โดยใช้วิธี X-Ray fluorescence ในการวิเคราะห์ แล้วนำองค์ประกอบดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยใช้วิธีดังกล่าวในการทำวิจัยเช่นกัน แสดงในตารางที่ 2.14 เพื่อจะทำการศึกษาคู่สมบัติทางเคมีเบื้องต้นของเพอร์ไลต์และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้เป็นข้อมูลคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุทั้ง 2 ชนิดให้สามารถใช้เป็นวัตถุดิบที่สามารถนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้างได้

ตารางที่ 2.11 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์กับเพอร์ไลต์
(จิตรกร ตังอนุสรณ์สุข, 2548)

ออกไซด์	สัญลักษณ์	ปริมาณโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ (%)	ปริมาณโดยน้ำหนักของเพอร์ไลต์ในประเทศไทย (%)
CaO	C	60 - 70	0.6
SiO ₂	S	17 - 25	71.0
Al ₂ O ₃	A	3.0 - 8.0	16.1
Fe ₂ O ₃	S	0.5 - 6.0	0.7
MgO	M	0.1 - 4.0	0.4
Na ₂ O	N	0.1 - 1.8	0.9
K ₂ O	K	0.1 - 1.8	5.6
SO ₃	S	0.5 - 3.0	-
FeO	Fe	-	0.7
H ₂ O	-	-	3.6
สารประกอบอื่นๆ	-	0.5 - 3.0	-
(Loss on ignition)	LOI	0.1 - 3.0	-
(Insoluble residue)	-	0.20 - 0.75	-

ประพัตร์ กรังพานิชย์ (2540) ได้ศึกษาถึงการนำกากแร่สังกะสีและวัสดุพูนเบาเพอร์ไลต์มาผลิตเป็นคอนกรีตมวลเบา โดยนำกากแร่สังกะสีใช้เป็นวัสดุผสมแทนทรายและเพอร์ไลต์เพื่อลดน้ำหนักของคอนกรีต และยังได้ศึกษาถึงองค์ประกอบและคุณสมบัติของเพอร์ไลต์ในด้านต่างๆ เช่น องค์ประกอบหลักทางเคมีของเพอร์ไลต์ โดยวิธี X-Ray Fluorescence ซึ่งพบว่าองค์ประกอบหลักของเพอร์ไลต์ที่มีปริมาณสูง ได้แก่ SiO₂ ซึ่งพบในปริมาณ 70.29% ส่วน Al₂O₃ และ K₂O พบในปริมาณ 13.64 และ 5.73% ตามลำดับ ด้านองค์ประกอบรอง (trace element) ที่พบในปริมาณไม่มากนัก ได้แก่ P₂O₅, MgO, CaO และยังได้ศึกษาถึงความหนาแน่นรวม (Bulk density) โดยนำเพอร์ไลต์มาบดแล้วคัดขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐาน เพื่อหาขนาดของเพอร์ไลต์ที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นมวลรวมผสมคอนกรีต ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ขนาด 0.850 mm มีความเหมาะสมในการใช้งาน และค่าความหนาแน่นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่มีการใช้โดยทั่วไปคือ 40 ถึง 300 kg/m³

Demirboga (2001) กล่าวว่าวิธีที่การมากมายที่ใช้ผลิตคอนกรีตมวลเบา (LWC) หนึ่งในวิธีนั้นคือ การไม่ใช้มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า “No-fines” ส่วนวิธีอื่นๆที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบา คือ การใส่สารเคมีผสมเพิ่มเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศภายในคอนกรีตที่รู้จักกันคือ Aerated concrete cellular concrete หรือ Gas concrete วิธีที่ได้รับความนิยมในการผลิต LWC คือ การใช้ส่วนผสมมวลเบาจากธรรมชาติหรือจากการผลิต ซึ่งสามารถหาได้ และสามารถผลิตคอนกรีตให้มีความเหมาะสมในการใช้งานได้ทั้งหน่วยน้ำหนักและความแข็งแรงอิฐมวลเบา (LWC blocks) ได้ถูกกำหนดให้ต้องมีกำลังอัดอย่างน้อยที่สุด ประมาณ 36 ksc หน่วยน้ำหนัก $1,680 \text{ kg/m}^3$ โดยมาก LWC blocks ใช้สำหรับทำผนังเป็นฉนวนกันความร้อนของหลังคาและพื้นของอาคาร

จากข้อมูลของ Demirboga (2001) พบว่าทั่วโลกได้มีการพัฒนาวัสดุซีเมนต์ที่สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีต เช่น ซิลิกาฟูม และเถ้าลอย เป็นต้น ซึ่งซิลิกาฟูมเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตโลหะจำพวก Silicon ส่วนเถ้าลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ปริมาณของเถ้าลอยทั่วโลกมีอยู่ประมาณ 600 ล้านตัน แต่มีการนำมาใช้ในงานคอนกรีตเพียง 10% เท่านั้น และเนื่องจากการพัฒนาทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็ว การใช้พลังงานของประชากรโลกจึงเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้นด้วย จึงทำให้เกิดปัญหาหามลภาวะเป็นพิษทางอากาศและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะนำวัสดุดังกล่าวมาใช้ให้เกิดประโยชน์ซึ่งเถ้าลอยและซิลิกาฟูมสามารถใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตได้ เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นสารประกอบซิลิเกต

Demirboga (2001) ได้ศึกษาผลกระทบบของเพอร์ไลต์และสารแร่ธาตุผสมเพิ่มที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา โดยใช้เพอร์ไลต์แทนที่หินปูน 20, 40 และ 60% ซิลิกาฟูม และเถ้าถ่านหิน Class C แทนที่ปูนซีเมนต์ 10, 20 และ 30% ใช้สารลดน้ำจำนวนมาก 1.5% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ควบคุมปริมาณวัสดุประสานที่ 200 kg/m^3 หล่อตัวอย่างโดยใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาด $100 \times 200 \text{ mm}$ ควบคุมค่ายุบตัวที่ $20 \pm 5 \text{ mm}$ ทำการบ่มในแบบหล่อ 1 วัน และบ่มในน้ำอีก 6 และ 27 วัน แล้วทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C192 จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของเพอร์ไลต์จากประเทศตุรกีพบว่า มีปริมาณสารประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เมื่อรวมกันแล้วมีค่ามากกว่า 70% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2.12 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน และเพอร์ไลต์

(Demirboga, Orung และ Gul, 2001)

ออกไซด์	ปูนซีเมนต์ (%)	ซิลิกาฟูม (%)	เถ้าถ่านหิน (%)	เพอร์ไลต์ (%)
SiO ₂	19.8	85.0 - 95.0	30.6	71.0 - 75.0
Al ₂ O ₃	5.6	1.0 - 3.0	14.8	-
Fe ₂ O 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 - 1.2	2.5	-
SO ₃	2.4	-	4.9	-
C	-	0.5 - 1.0	-	-
K ₂ O	-	-	-	-
Na ₂ O	-	-	-	2.9 - 4.0
TiO ₂	-	-	-	-
LOI	0.4	0.5 - 1.0	2.4	-

2.6 ดินขาว (Kaolin)

2.6.1 ประวัติความเป็นมาของดินขาวเผา

ดินขาวเผา (Metakaolin) ได้จากการนำดินขาวดิบ (Kaolin) ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติมาเผาในช่วงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมโดยทั่วไปมีลักษณะของผลึกเป็นอันขรุขระ (Amorphous) มีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือสีชมพูขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุเหล็กที่เป็นองค์ประกอบทางเคมี โดยทั่วไปมีซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) และอลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) เป็นหลักดินขาวเผามีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มากโดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 1.5 ไมครอน (Balaguru, 2001) ดินขาวเผาจัดเป็นสารปอซโซลาน Class N Raw หรือ Calcined pozzolans ตามมาตรฐาน ASTM C 618 เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำ จะเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (3CaO·2SiO₂·3H₂O; CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (3CaO·2Al₂O₃·3H₂O; CAH) ที่มีความสามารถในการเชื่อมประสานและเพิ่มกำลังคอนกรีตนอกจากปฏิกิริยาเคมี (Pozzolanic reaction) ที่เกิดขึ้นแล้ว ดินขาวเผายังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพอีกด้วย โดยอนุภาคของดินขาวช่วยลดความพรุน (Porosity) ในเนื้อ

คอนกรีตโดยอนุภาคของดินขาวเผาที่มีขนาดเล็กเข้าไปแทรกช่องว่างระหว่างอนุภาคซีเมนต์ (Microfiller effect) ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นขึ้น ดังนั้น การใช้ดินขาวเผาผสมในคอนกรีตมีผลในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในด้านกำลัง (Strength) และความทนทาน (Durability)

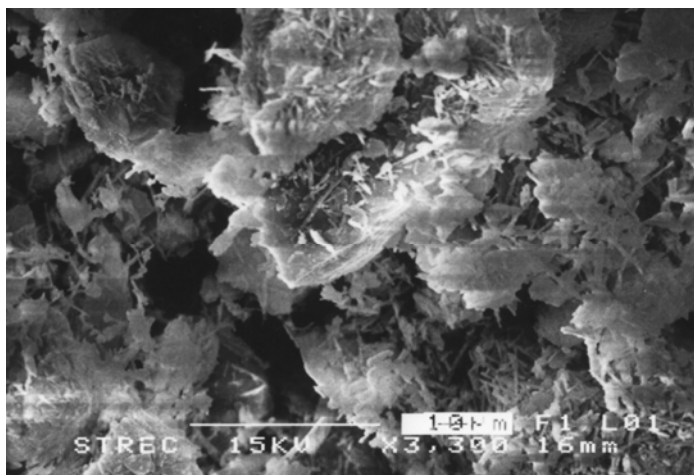
2.6.2 คุณสมบัติทางกายภาพของดินขาว

ลักษณะทางกายภาพของดินขาวที่ชัดเจนคือเป็นฝุ่นผงสีส้มอ่อนที่ละเอียดมากจากภาพถ่ายด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ในภาพที่ 2.7 พบว่าดินขาวมีรูปร่างของอนุภาคไม่แน่นอน ส่วนใหญ่เป็นแผ่นมีรูพรุนและเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน ดินขาวมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 9 ไมครอน และมีการกระจายขนาดดังแสดงในภาพที่ 3 มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 9,800 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม จากการทดสอบความละเอียดโดยวิธีวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ (Blaine specific surface area) ตามมาตรฐาน ASTM C 204 ดังแสดงในตารางที่ 2.13 อนุภาคดินขาวมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ถึง 3 เท่า

ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และดินขาว (ASTM C 168) ดังแสดงในตารางที่ 2.13 ดินขาวมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.43 ซึ่งต่ำกว่าซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทั้งนี้ค่าความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันเป็นผลเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์และเหล็กออกไซด์ที่มีมวลโมเลกุลสูงอยู่ในปริมาณมาก ในขณะที่ดินขาวมีองค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินาที่มีมวลโมเลกุลต่ำอยู่ในปริมาณมาก (Sayamipuk, 2000)

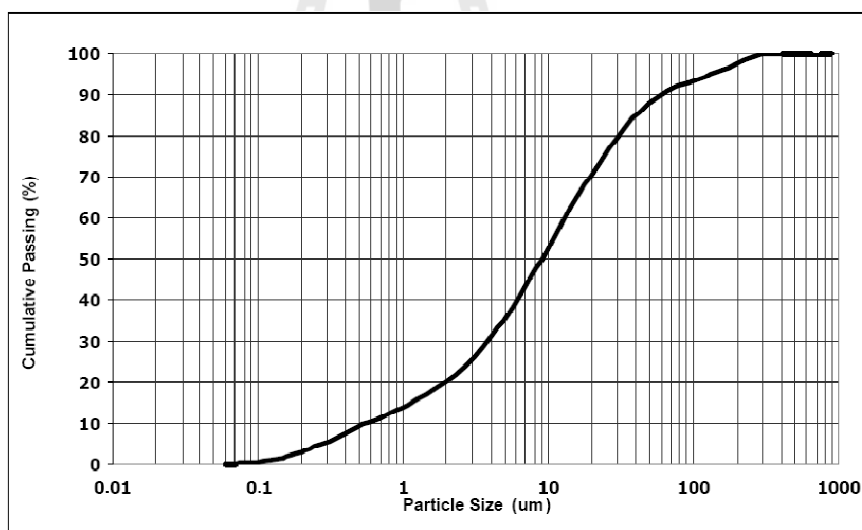
ตารางที่ 2.13 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และดินขาว

คุณสมบัติ	ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	ดินขาว
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.43
พื้นที่ผิวจำเพาะ	3190	9800



รูปที่ 2.7 ภาพขยายอนุภาคดินขาว

ที่มา : ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2545)



รูปที่ 2.8 การกระจายตัวของอนุภาคดินขาว

ที่มา : ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2545)

2.6.3 คุณสมบัติทางเคมีของดินขาว

องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวแสดงในตารางที่ 4 โดยมีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณร้อยละ 54.64 และ 42.87 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบตามการแบ่งประเภทของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618 ดังแสดงในตารางที่ 5 ดินขาวมีปริมาณผลรวมของซิลิกาออกไซด์, อลูมินาออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ ร้อยละ 98.52 และไม่มีพบสารซัลเฟอไรต์รอกไซด์ (SO_3) ที่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดและเวลาในการก่อตัวของคอนกรีตซึ่งมาตรฐานกำหนดปริมาณไว้สูงสุดไม่เกินร้อยละ 4 สำหรับความชื้นและค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition) มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด จึงอาจจัดได้ว่าดินขาวที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้จัดอยู่ใน Class N ตามมาตรฐาน ASTM C 618 และจากการวิเคราะห์สถานะของผลึกด้วยเครื่อง X-Ray diffraction spectroscopy ดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่าส่วนใหญ่ดินขาวจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก (Glassy phase) ซึ่งเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดี

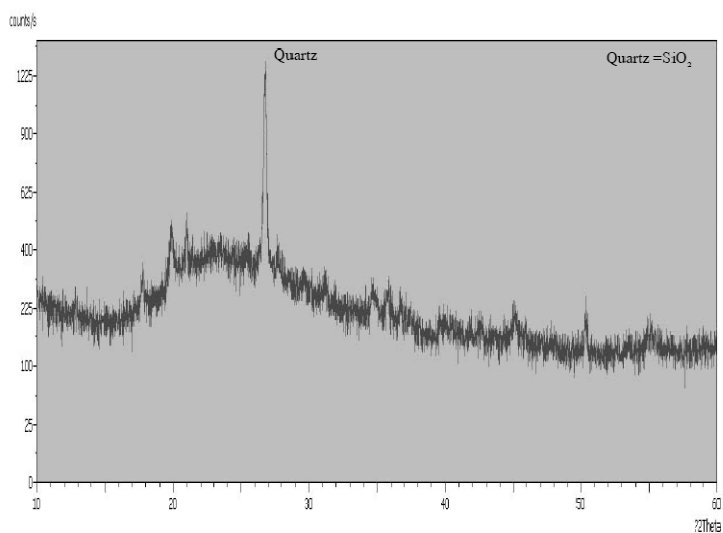
ตารางที่ 2.14 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาว

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)
SiO_2	54.64
Al_2O_3	42.87
Fe_2O_3	1.01
Cao	0.01
Mgo	-
K_2O	1.16
Na_2O	-
SO_3	-
LOI	1.10

ที่มา : ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2545)

ตารางที่ 2.15 องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของดินขาวเปรียบเทียบตามมาตรฐาน
ASTM C 618

คุณสมบัติ	ประเภท N	ประเภท F	ประเภท C	ดินขาว
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ไม่น้อยกว่า (%)	70	70	50	98.52
SO_3 ไม่เกิน (%)	4	5	5	-
Moisture content ไม่เกิน (%)	3	3	3	0.45
Loss on ignition (LOI) ไม่เกิน (%)	10	6	6	1.10
Specific gravity	2.10-2.58	2.10-2.58	2.10-2.58	2.43
Blaine fineness, cm^2/g	2400-4800	2400-4800	2400-4800	9800

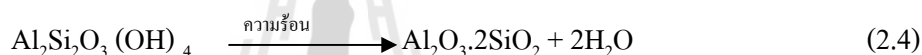


รูปที่ 2.9 ภาพวิเคราะห์ X-Ray Diffraction Spectroscopy ของดินขาว
ที่มา : ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2545)

2.6.4 การปรับปรุงคุณภาพดินขาวดิบด้วยความร้อน

คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของดินขาวดิบ ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_3 \cdot (\text{OH})_4$) จะแตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ การนำดินขาวดิบมาผสมกับคอนกรีตโดยตรงอาจทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติไม่แน่นอน จากผลวิจัยของ Sayamipuk (2543) พบว่ามอร์ต้าผสมดินขาวดิบจากแหล่งในประเทศไทยที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนให้กำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าควบคุม ในขณะที่มอร์ต้าผสมดินขาวดิบที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น

การปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนโดยการนำดินขาวดิบมาผ่านกระบวนการเผาเพื่อเป็นการปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมี ทำให้โครงสร้างภายในมีการเปลี่ยนแปลงกลายสภาพเป็นดินขาว ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$; AS_2) ซึ่งมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้ผสมคอนกรีต ดังสมการ (Salvador, 1995)



อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาดินขาวดิบมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินขาว โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 650 ถึง 850°C (Nevill, 1996) และจากการวิจัยของ Murat และ Comel (1983) ที่ทำการศึกษาวิธีการและอุณหภูมิในการเผาดินขาว โดยทำการทดลองเผาดินขาวดิบด้วยวิธีการเผาแบบถังนิ่ง (Fixed-bed) และแบบถังกวน (Stirred-bed) หรือการเผาแบบหม้อหมุน (Rotary klin) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาทั้ง 2 วิธีอยู่ในช่วง 700-800°C สำหรับวิธีการเผาแบบถังนิ่งเวลาที่เหมาะสมคือ 6 ชั่วโมง ซึ่งให้กำลังต้านทานแรงอัดของดินขาวผสมคลัสเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำที่อายุการบ่มระหว่าง 7-90 วัน สูงกว่ากำลังอัดของดินขาวจากวิธีการเผาแบบถังกวนซึ่งเวลาที่เหมาะสมในการเผา คือ 3 ชั่วโมง

สำหรับในประเทศไทยมีการรายงานในการศึกษาถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาดินขาวดิบ โดย อนุพงษ์ (2543) ศึกษาศักยภาพและเงื่อนไขที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพของดินขาวในประเทศไทยจาก 3 แหล่ง ได้แก่ แหล่งปราจีนบุรี ระนอง และลำปาง โดยนำดินขาวดิบมาเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 700 800 900 และ 1000°C และแปรผันเวลาในการเผา คือ 4 6 และ 8 ชั่วโมง จากการทดลองเมื่อพิจารณาจากดัชนีกำลัง (Strength activity index) ของมอร์ต้าผสมดินขาวที่ได้จากการเผา พบว่าวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินขาวดิบที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับดินขาวดิบทั้ง 3 แหล่งคือเผาด้วยอุณหภูมิ 800°C อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง โดยมอร์ต้าที่ผสมดิน

ขาวเผาจากแหล่งปราจีนบุรีให้ค่าดัชนีกำลังสูงที่สุดร้อยละ 131 เมื่อเทียบกับมอร์ต้าที่ผสมดินขาวจากแหล่งจังหวัดระนองและลำปางที่ให้ค่าดัชนีกำลังร้อยละ 115 และ 100 ตามลำดับ

นอกจากนี้ Hengsadeeikul (1995) ได้ศึกษาดินขาวดิบจากแหล่งจังหวัดลำปาง โดยนำดินขาวดิบที่ผ่านการล้าง (Washed kaolin) และดินขาวที่ผ่านการบด (Crushed kaolin) มาเผาที่อุณหภูมิ 750°C พบว่ากำลังต้านทานแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้าผสมดินขาวที่ได้จากการเผาดินขาวดิบที่ผ่านการล้างมีค่าสูงกว่าดินขาวดิบบดร้อยละ 6.4 และได้ทำการทดลองหาอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมโดยแปรผันอุณหภูมิที่ 750 800 และ 850°C พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาคือ 800°C

2.7 ซิลิกา หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์

2.7.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับซิลิกา

ซิลิกา หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นสารประกอบที่เกิดจากการรวมตัวระหว่าง ซิลิกอนและออกซิเจน เป็นผลึกที่ไม่มีสี หรือ สีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความถ่วงจำเพาะในช่วง 2.2-2.6 จุดหลอมเหลว 1,170°C ขึ้นกับรูปแบบของซิลิกา ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้เล็กน้อย ไม่ละลายในกรดทุกชนิด ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก แต่สามารถละลายได้โดยการหลอมกับด่าง และรวมกับออกไซด์ของโลหะส่วนใหญ่ได้ ไม่ลุกติดไฟ แต่สามารถหลอมเป็นแก้วที่มีสัมประสิทธิ์การแตกตัวต่ำ มีการนำความร้อนประมาณครึ่งหนึ่งของแก้ว ในทางการค้า ซิลิกาเป็นแหล่งผลิตซิลิกอนและถูกใช้ในปริมาณมาก ซึ่งเป็นส่วนของวัสดุที่ใช้ในก่อสร้าง ในส่วนของซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica) ถูกใช้เป็นสารดูดความชื้น สารดูดซับ สารเพิ่มความแข็งแรง สารเติมแต่ง และองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

ซิลิกา มีคุณสมบัติทางเคมีค่อนข้างเสถียร ที่อุณหภูมิปกติ และไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีหลายชนิด แต่อย่างไรก็ตาม ไม่ได้หมายความว่า ซิลิกาจะไม่ทำปฏิกิริยากับสารชนิดใดเลยเพราะซิลิกาสามารถเปลี่ยนรูปได้ และอุณหภูมิสูงความว่องไวในปฏิกิริยาของซิลิกาจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของซิลิกา การเตรียมและสภาวะของซิลิกาชนิดอสัณฐาน จะว่องไวมากกว่าผลึกซิลิกาที่เป็นเช่นนี้เพราะอสัณฐานซิลิกามีพื้นที่ผิวมาก

2.7.2 โครงสร้างของซิลิกา (Silica polymorphs)

ซิลิกา(ซิลิกอน ไดออกไซด์: SiO_2) ที่ความดันบรรยากาศปกติ(ที่อุณหภูมิ 25°C และที่ความดันบรรยากาศ 1 atm) ผลึกของซิลิกามีได้สามรูปแบบคือ

- ควอตซ์ (Quartz) ได้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 870°C
 - ก) แอลฟาควอตซ์ (α -Quartz) เกิดขึ้นในรูป SiO_2 ในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 573°C

- ข) เบต้าควอตซ์ (β -Quartz) เกิดที่อุณหภูมิ 573 ถึง 873°C

- ไตรไดไมท์ (Tridymite) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิระหว่าง 870 ถึง 1470°C

- ก) แอลฟาไตรไดไมท์ (α -Tridymite) เป็นเฟสที่แฝงอยู่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 117°C

- ข) เบต้าไตรไดไมท์ (β -Tridymite) เกิดที่อุณหภูมิ 870 ถึง 1470°C

- คริสโตบาไลต์ Cristobalite จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิระหว่าง 1470 ถึง 1710°C

- ก) แอลฟาคริสโตบาไลต์ (α -Cristobalite) เป็นเฟสที่แฝงอยู่ในเฟสอื่นเกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้อง จนถึงอุณหภูมิ 200 ถึง 275°C แต่ไม่เสถียร

- ข) เบต้าคริสโตบาไลต์ (β -Cristobalite) เป็นเฟสที่แฝงอยู่ในเฟสอื่นเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 200 และ 275 ถึง 1470°C และจะเสถียรในรูปซิลิกาที่อุณหภูมิ 1470°C หลังจากนั้นจะเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1713°C เมื่ออุณหภูมิที่สูงกว่าเฟสของคริสโตบาไลต์ ยังมีเฟสของซิลิกาอีกสองเฟสที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะความดันและอุณหภูมิสูงๆ

- โคอีไซต์ (Coesite) เกิดขึ้นภายใต้สภาวะความดันสูงประมาณ

2.3 GPa ถึง 7.8 GPa

- สทิสโฮไวท์ (Stoschovite) เกิดขึ้นภายใต้ความดันสูงกว่า 7.8 GPa

2.7.3 การใช้ประโยชน์จากซิลิกาในซีเมนต์

การใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่มีอนุภาคนาโนเมตร (ซิลิกอนไดออกไซด์ เป็นออกไซด์หลักที่มีอยู่มากกว่าร้อยละ 90 ในเถ้าแกลบ หรือ ซิลิกาฟูม) เพื่อใช้เป็นส่วนผสมเพิ่มเติม (Additive) เพื่อทำคอนกรีตคุณภาพสูง หรือ คอนกรีตที่ไหลเข้าแบบได้ ด้วยตัวเอง ซึ่งการใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ขนาดนาโนทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเพิ่มขึ้นและยังเพิ่มกำลังอัดประลัยให้กับคอนกรีตอีกด้วย ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดและกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่ผสมอนุภาคนาโนข้างต้นมีค่าเพิ่มขึ้น หรือมีการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตน้อยลง เนื่องจาก

- อนุภาคนาโนมีการกระจายตัวดีขึ้นในส่วนผสม เพิ่มความหนืดของของเหลวในมอร์ตาร์ (เพราะอนุภาคนาโนเล็กมาก) จึงทำให้เม็ดปูนซีเมนต์ และมวลรวมสามารถลอยอยู่ในของเหลว (ระหว่างที่เป็นมอร์ตาร์สด) ได้ดีขึ้น จึงลดการแยกตัวของส่วนผสม และทำให้กำลังของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น
- อนุภาคนาโนไปอุดช่องว่างต่างๆระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์ และไอน้ำอิสระในส่วนผสมให้ออกไป จึงทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง กำลังจึงสูงขึ้น
- การกระจายตัวที่ดีและสม่ำเสมอของอนุภาคนาโนจะเป็นแกนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วและสมบูรณ์มากขึ้น
- SiO_2 อนุภาคนาโนจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับ Ca(OH)_2 ได้อย่างรวดเร็ว และสมบูรณ์มากขึ้น เพิ่มปริมาณ CSH ส่งผลให้มอร์ตาร์มีกำลังสูงขึ้น ผลที่ตามมาอีกประการหนึ่งก็คือ การที่ Ca(OH)_2 มีปริมาณน้อยลงย่อมเป็นผลดีต่อคอนกรีต เพราะจะทำให้คอนกรีตมีความคงทนต่อสารละลายซัลเฟตหรือกรดต่างๆ ได้ดีขึ้น
- อนุภาคนาโนทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมดีขึ้น จึงทำให้กำลังของมอร์ตาร์ดีขึ้น
- ส่วนผสมที่เป็นอนุภาคนาโนช่วยลดหรือป้องกันไม่ให้อายุการใช้งานขยายตัวขึ้น จึงเพิ่มการรับแรงเฉือน แรงดึง แรงดัดตลอดจนความแข็งแรงของวัสดุ

2.7.4 ประโยชน์ของอนุภาคนาโนเมตร

- พื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง เพิ่มขึ้นตามขนาดเกรนที่ลดลง
- ความหนาแน่นต่อหน่วยบรรจุสูง
- ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี
- โปร่งแสง
- มีผิวสัมผัสระหว่างหน่วยย่อยสูง ทำให้ให้แข็งแรง ทนทานของวัสดุผสม

2.8 ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้นของรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีอำนาจทะลุทะลวงสูง มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1 ถึง 100 อังสตรอม (หรือ 0.01-10 นาโนเมตร) ค้นพบครั้งแรกโดยเรินต์เกน (W.C.Rontgen) ในปี ค.ศ.1895 ต่อมาได้มีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ การเกิดอัตรากิริยาต่อสสาร ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น เกิดการเปล่งรังสี การดูดกลืน การกระเจิง และการเลี้ยวเบน เป็นต้น ปรากฏการณ์เหล่านี้ล้วนเป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิดซึ่งหลักการดังกล่าวนี้สามารถนำมาวิเคราะห์สารนั้นได้ เช่น ใช้ศึกษาโครงสร้างอิเล็กตรอน (Electron structure) ซึ่งสามารถให้ข้อมูลการเกิดพันธะเคมี หรือใช้ศึกษาโครงสร้างของสาร เป็นต้น

2.8.1 การเกิดรังสีเอ็กซ์

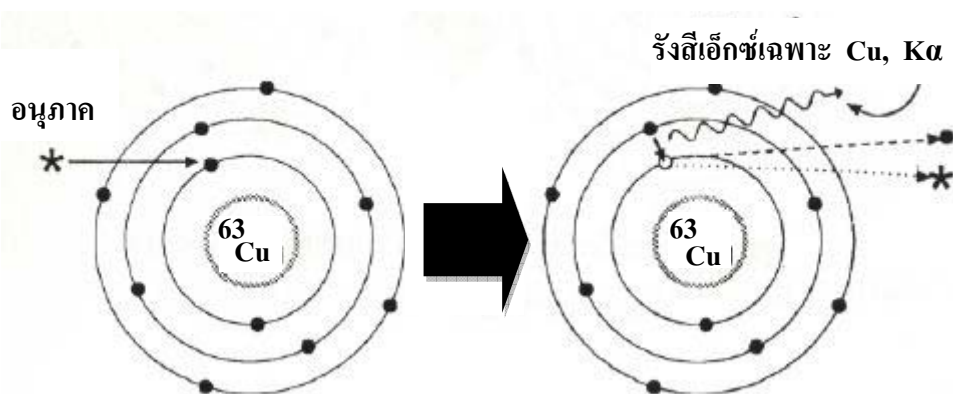
รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ปล่อยออกมาโดยอะตอมของธาตุภายหลังถูกกระตุ้นด้วยวิธีใดวิธีการหนึ่ง การกระตุ้นดังกล่าวอาจแบ่งออกเป็นสองประเภทใหญ่ ประเภทแรกเป็นการกระตุ้นโดยอาศัยพลังงานจากภายนอกของอะตอม ประเภทที่สองเป็นการกระตุ้นโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงภายในอะตอม ในประเภทที่สองนี้เกิดขึ้นในอะตอมของธาตุที่เป็นกัมมันตรังสี การเกิดรังสีเอ็กซ์นี้สามารถนำมาอธิบายในเรื่อง XRF (X-ray fluorescence) ได้ทั้งในส่วนของการเกิดรังสีเอ็กซ์เฉพาะจากสารตัวอย่างและการเกิดรังสีเอ็กซ์จากหลอดที่จะใช้ในการกระตุ้นสารตัวอย่าง

- การกระตุ้นโดยอาศัยพลังงานจากนอกอะตอม

พลังงานจากภายนอกอะตอมนี้อาจอยู่ในรูปของอนุภาคที่มีพลังงานสูงหรือ โฟตอนซึ่งอาจเป็นรังสีเอ็กซ์หรือรังสีแกมมาก็ได้

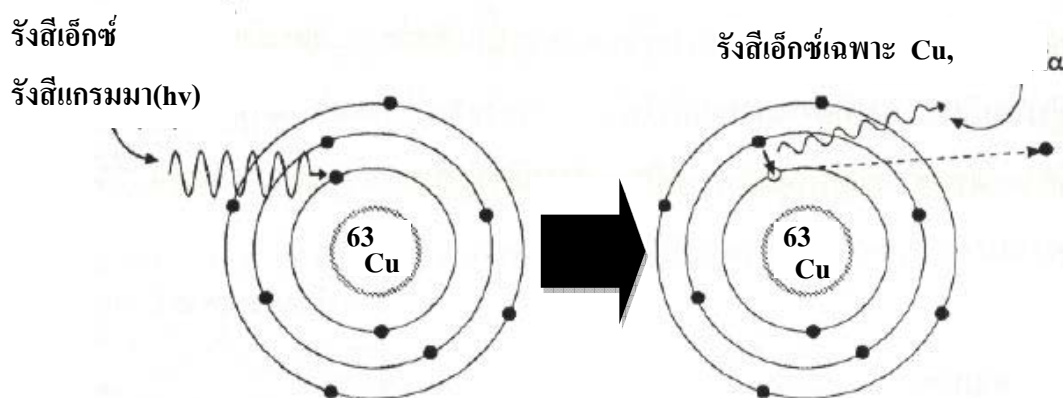
- อนุภาคพลังงานสูง (High energy particles) อนุภาคในที่มีมักเป็น

อิเล็กตรอนหรือ โปรตรอน ในกรณีนี้อนุภาคจะถูกปล่อยมาจากแหล่งอื่นและถูกเร่งให้เคลื่อนที่อย่างรวดเร็วมีพลังงานจลน์สูง เมื่ออนุภาคนี้ผ่านเข้ามาในอะตอม อนุภาคบางส่วนก็จะมีแนวโน้มที่จะชนกับอิเล็กตรอนในอะตอม ในการชนนี้จะถ่ายทอดพลังงานให้แก่อิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้นและโดยทั่วไปมักจะสูงมากพอที่จะหลุดออกจากอะตอมเป็นอิเล็กตรอนที่อยู่ที่สูงกว่าก็จะตกลงมาอยู่แทนที่ โดยในการตกลงมาอยู่ชั้นต่ำกว่านี้อิเล็กตรอนก็ต้องปล่อยหรือคายพลังงานที่มีอยู่มากเกินระดับที่ต้องการออกไป พลังงานที่คายออกมานี้จะอยู่ในรูปรังสีเอ็กซ์มีค่าเฉพาะแต่ละชนิด การเกิดรังสีเอ็กซ์โดยการกระตุ้นวิธีนี้ ดังรูปประกอบที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การเกิดรังสีเอกซ์โดยการกระตุ้นด้วยอนุภาค

ก) โฟตอนพลังงานสูง (High energy photon) โฟตอนที่ใช้ในกรณีนี้อาจเป็นรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาที่ปล่อยมาจากแหล่งอื่น เมื่อโฟตอนผ่านเข้ามาในอะตอมบางส่วนมีความน่าจะเป็นที่จะชนและถ่ายทอดพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในอะตอม ถ้าอิเล็กตรอนได้รับพลังงานมากพอ มันจะหลุดออกไปจากอะตอมเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (โฟโตอิเล็กตรอน: Photoelectron) ดังรูปประกอบที่ 2.11 ปล่อยให้มีความว่างในอะตอมซึ่งอิเล็กตรอนในชั้นพลังงานที่สูงกว่าก็จะตกลงมาแทนที่และมีการปล่อยพลังงานออกมาเช่นกันเป็นรังสีเอกซ์เฉพาะของธาตุนั้น

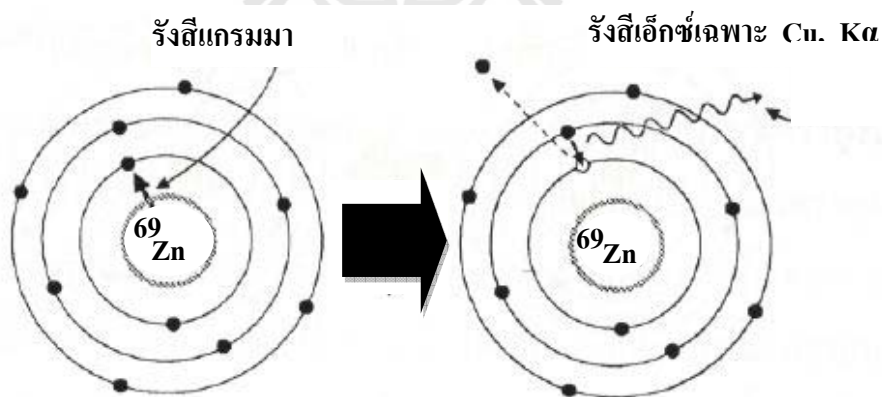


รูปที่ 2.11 การเกิดรังสีเอกซ์โดยการกระตุ้นด้วยโฟตอน

2.8.2 การกระตุ้นโดยพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงภายในอะตอม

การเปลี่ยนแปลงภายในระดับอะตอม อะตอมที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงนี้จะต้องเป็นอะตอมของสารกัมมันตรังสีซึ่งมีการเปลี่ยนแปลง (หรือการสลายตัว) เกิดขึ้นตลอดเวลาโดยธรรมชาติ การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จึงเป็นการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์นั่นเอง ซึ่งในที่นี้จะนำมากล่าวเฉพาะบางวิธีที่มีผลทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์ ดังนี้

- การสลายตัวแบบการเปลี่ยนแปลงภายใน (Internal conversion) เกิดจากนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีผ่อนคลาย (Relax) จากสถานะกระตุ้นลงสู่สถานะพื้น (Ground state) และคายพลังงานออกมา เนื่องจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานภายในนิวเคลียสเป็นการเปลี่ยนช่วงพลังงานที่สูงมาก พลังงานที่ปล่อยออกมาเป็นโฟตอนพลังงานสูงเรียกว่า รังสีแกมมา รังสีแกมมา เมื่อออกจากนิวเคลียสก็มีความน่าจะเป็นที่จะชนกับอิเล็กตรอนที่โคจรอยู่รอบนิวเคลียส ในการชนกับอิเล็กตรอนจะถ่ายทอดพลังงานให้อิเล็กตรอนจนอิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอและหลุดออกไปจากอะตอมได้ อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาโดยวิธีนี้ เรียกว่า อิเล็กตรอนจากการเปลี่ยนแปลงภายใน (Internal conversion electron) และเกิดที่ว่างขึ้นภายในอะตอม ซึ่งอิเล็กตรอนอื่นที่อยู่ในระดับชั้นพลังงานสูงกว่า ก็จะตกลงมาแทนที่และคายพลังงานออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การเกิดรังสีเอ็กซ์โดยการสลายตัวแบบการเปลี่ยนแปลงภายใน

- การสลายตัวแบบจับอิเล็กตรอน (Electron capture) ในการสลายตัวแบบนี้ อิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสโดยเฉพาะในชั้นที่อยู่ใกล้นิวเคลียสจะ ถูกจับหรือดึงดูดเข้าสู่ นิวเคลียส ทำให้เกิดที่ว่างขึ้นซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นสูงกว่าก็จะตกลงมาอยู่แทนพร้อมทั้งคายรังสีเอ็กซ์ ออกมา

2.8.3 ประเภทของรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์มีทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น จากการสลายตัวของนิวเคลียสธาตุ กัมมันตรังสี และที่มนุษย์ทำให้เกิดขึ้น เช่น การเร่งอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าสูงวิ่งเข้าชน อิเล็กตรอนของอะตอม ทำให้อิเล็กตรอนของอะตอมหลุดไป อิเล็กตรอนวงนอกเข้าไป แทนที่ ปลดปล่อยพลังงานในรูปรังสีเอ็กซ์ เรียกว่า รังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว ส่วนรังสีกรณีรังสีเอ็กซ์ที่เกิด จากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนที่เร่งด้วยสนามไฟฟ้ากับอิเล็กตรอนของอะตอม เรียกว่า รังสี เอ็กซ์แบบต่อเนื่อง

รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่องเป็นรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานในช่วงกว้าง รังสีเอ็กซ์แบบต่อเนื่องนี้ มักนิยมเรียกในอีกชื่อหนึ่งว่า “รังสีเบรมสตราลุง (Bremsstrahlung)” หนึ่งรังสีเบรมสตราลุงนี้อาจ เกิดขึ้นได้หลายวิธี สำหรับในกรณีที่ใช้หลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ก็มีรังสีเบรมสตราลุงเกิดขึ้นด้วยเสมอ โดยอิเล็กตรอนถูกปล่อยออกมาจากแคโทด (ขั้วลบ) และถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ไปชน กับอิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอมที่แอโนด การผลักรันนี้จะทำให้ความเร็วของอิเล็กตรอนลดลงซึ่งก็ หมายความว่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนลดลงด้วยนั่นเอง พลังงานส่วนที่ถูกลดลงนี้จะถูกคาย ออกมาในรูปเป็นแถบพลังงานครอบคลุมช่วงบริเวณกว้างซึ่งเรียกว่ารังสีเบรมสตราลุง นั่นเอง จาก หลักการที่อธิบายมานี้ถ้าหากพิจารณาในรายละเอียดลงไป ก็จะทำให้เข้าใจเกี่ยวกับรังสีเบรมสตรา ลุงมากขึ้น คือ

- การผลักรันระหว่างอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่กับอิเล็กตรอนในอะตอมนั้น จะ เห็นได้ว่า ถ้าอะตอมขนาดใหญ่ก็จะมีอิเล็กตรอนมาก การผลักรันก็จะเกิดได้มากและรุนแรงขึ้น ดังนั้น ถ้าแอโนดทำด้วยธาตุที่เป็นอะตอมใหญ่ (มีเลขอะตอมสูง) ก็จะเกิดรังสีเบรมสตราลุงได้ มาก คือ รังสีมีความเข้มมาก (หมายถึงมีปริมาณรังสีมากไม่เกี่ยวกับค่าพลังงานสูงหรือต่ำ)

- ถ้าปริมาณอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้าหาแอโนดมีมากก็จะเกิดรังสีเบรมสตรา ลุงได้มากเช่นกัน ทั้งนี้ปริมาณอิเล็กตรอนจะมากหรือน้อยถูกกำหนดโดยกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ แคโทด

- อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้าหาแอโนดจะมีพลังงานจลน์ด้วย พลังงานจลน์จะ มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าหรือค่าความต่างศักย์ระหว่างแคโทดกับแอโนด ถ้าความต่างศักย์ สูงอิเล็กตรอนก็จะถูกเร่งมากมีพลังงานจลน์สูง การผลักรันกับอะตอมที่แอโนดก็จะเกิดได้รุนแรง

ขึ้น รังสีเบรมสตราลูงก็จะเกิดได้มากขึ้นหรือมีความเข้มมากขึ้นนั่นเอง (แม้จะเกิดผลกกันแล้วแต่ อิเล็กตรอนก็จะยังคงเคลื่อนที่ต่อไปได้และชนกับอะตอมในที่สุด)

พลังงานสูงสุดที่รังสีเบรมสตราลูงจะมีได้ก็คือไม่เกินค่าพลังงานจลน์ของ อิเล็กตรอนที่วิ่งมาจากแคโทดซึ่งจะถูกกำหนดโดยความแรงของสนามไฟฟ้า (หรือค่าความต่างศักย์ ระหว่างแคโทดกับแอโนดที่ใช้เร่งอิเล็กตรอน)

2.8.4 ผลที่ได้จากการเรืองรังสีเอ็กซ์ (Fluorescence yield)

ผลที่เกิดจากการเรืองรังสีเอ็กซ์ เป็นค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพของธาตุที่ปลดปล่อย ให้รังสีเอ็กซ์ เมื่ออิเล็กตรอนของธาตุถูกกระตุ้นจากพลังงานภายนอกทำให้เกิดที่ว่างขึ้น ความน่าจะเป็นที่อิเล็กตรอนตัวเดียวกันจะกลับเข้าสู่ชั้นระดับพลังงานเดิมก็เป็นไปได้ซึ่งจะไม่มีแผ่ของรังสีเอ็กซ์เกิดขึ้น ความน่าจะเป็นที่ที่ว่างในชั้นพลังงานของอะตอมหรือชั้นย่อยของอะตอมแล้วมี อิเล็กตรอนตัวอื่นในอะตอมเดียวกันมาแทนที่ขณะที่มีการปลดปล่อยพลังงานรังสีเอ็กซ์ออกมานั้นก็ เรียกว่า ผลที่ได้จากการเรืองรังสีเอ็กซ์ การจำกัดความของชั้น k ที่อยู่ด้านหน้าอะตอมซึ่งให้ผลการ เรืองรังสีเอ็กซ์ของชั้น k เป็นดังนี้

$$\omega_k = \frac{I_K}{n_K} \quad (2.5)$$

เมื่อ I_K คือ จำนวนโฟตอนทั้งหมดของรังสีเอ็กซ์เรย์เฉพาะ k ที่ปลดปล่อยจากสาร ตัวอย่างและ n_K จำนวนที่ว่างเบื้องต้นของชั้น k

ผลที่ได้จากการเรืองรังสีเอ็กซ์มีค่าสูงที่ชั้นอะตอมระดับสูงเป็นสิ่งที่ซับซ้อน เนื่องจากเหตุผลสองข้อนี้

- ชั้นพลังงานที่สูงกว่าชั้น k ประกอบด้วยชั้นพลังงานย่อยที่มากกว่าหนึ่งผลที่ได้จากการเรืองรังสีเอ็กซ์เฉลี่ยขึ้นอยู่กับการเกิดเป็น ไอออนของชั้นที่อิเล็กตรอนหลุดออกจากชั้นพลังงาน
- การเคลื่อนย้ายของ Coster-kroning จะไม่มีการแผ่รังสีระหว่างชั้นย่อยของอะตอมที่มีเลขควอนตัมหลักเดียว

ในกรณีที่ปราศจากการเคลื่อนย้ายของ Coster-kroning ผลที่ได้จากการเรืองรังสีเอ็กซ์ของชั้นพลังงานย่อยกับชั้นพลังงานที่มีเลขควอนตัมหลักกำกับได้ด้วย $X(X = L, M, \dots)$ มีสมการเป็น

$$\omega_i^X = \frac{I_i^X}{n_i^X} \quad (2.6)$$

ผลที่เกิดขึ้นจากการเรียงรังสีเอ็กซ์โดยเฉลี่ย ϖ_X สำหรับชั้น X เขียนได้ในรูป

$$\varpi_X = \sum_{i=1}^k N_i^X \omega_i^X \quad (2.7)$$

เมื่อ N_i^X เป็นจำนวนที่ว่างเบื้องต้นสัมพัทธ์ในระดับพลังงานย่อย i ของชั้น X

$$N_i^X = \frac{n_i^X}{\sum_{i=1}^k n_i^X} \quad \sum_{i=1}^k N_i^X = 1 \quad (2.8)$$

เครื่องหมายการรวมกันทั้งหมดในสมการ (1.3) และ (1.4) เป็นการรวมของระดับพลังงานย่อยของชั้นพลังงาน X สำหรับคำจำกัดความของผลที่ได้จากการเรียงรังสีเอ็กซ์เฉลี่ยการกระจายของที่ว่างเบื้องต้นจะต้องคงที่และไม่มีการเคลื่อนย้ายของ Coster-kroning นำสังเกตว่าค่า ϖ_X โดยทั่วไปไม่ใช่สมบัติทั่วไปของอะตอม แต่ขึ้นอยู่กับผลที่ได้จากการเรียงรังสีเอ็กซ์ของอะตอมในชั้นพลังงานย่อย ω_i^X และขึ้นอยู่กับจำนวนที่ว่างเริ่มต้น N_i^X ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของวิธีที่ทำให้อะตอมอยู่สถานะไอออน

ในกรณีที่มีการปรากฏขึ้นของการเคลื่อนย้ายของ Coster-kroning สามารถปรับปรุงการกระจายของที่ว่างภายในอะตอมที่อยู่สถานะไอออนจากหนึ่งระดับพลังงานย่อยที่ได้รับพลังงานหรือสูญเสียพลังงาน ผลการเรียงรังสีเอ็กซ์เฉลี่ยสามารถคำนวณได้สองวิธี วิธีหนึ่งผลการเรียงรังสีเอ็กซ์เฉลี่ย ϖ_X จะเป็นการรวมกับเชิงเส้นผลที่ได้จากการเรียงรังสีเอ็กซ์ของชั้นระดับพลังงานย่อย ω_i^X กับค่าการกระจายของที่ว่างภายในอะตอมที่ปรับปรุงโดยการเคลื่อนย้ายของ Coster-kroning เป็นดังสมการ

$$\varpi_X = \sum_{i=1}^k V_i^X \omega_i^X \quad \sum_{i=1}^k V_i^X > 1 \quad (2.9)$$

เมื่อ V_i^X เป็นจำนวนที่ว่างสัมพัทธ์ของพลังงานย่อย i ในชั้นพลังงาน X ซึ่งประกอบด้วย การเลื่อนที่ว่างภายในอะตอมแต่ละชั้นระดับพลังงานย่อย โดยใช้ การเคลื่อนย้ายของ Coster-kroning ค่า V_i^X สามารถอธิบายในรูปจำนวนสัมพัทธ์ N_i^X ของที่ว่างภายในอะตอมเบื้องต้นและที่น่าจะเป็นการเคลื่อนย้ายของ Coster-kroning สำหรับการเลื่อนที่ว่างพลังงานภายในอะตอมจากระดับพลังงานย่อย x_i ไปยัง X_i แสดงด้วย f_{ij}^X

$$V_1^X = N_1^X \quad (2.10)$$

$$V_2^X = N_2^X + f_{12}^X N_1^X \quad (2.11)$$

$$V_3^X = N_3^X + f_{23}^X N_2^X + (f_{13}^X + f_{12}^X f_{23}^X) N_1^X \quad (2.12)$$

อีกวิธีการหนึ่ง ผลที่ได้จากการเรืองรังสีเอ็กซ์เฉลี่ย ω_X การรวมกันเชิงเส้นของที่ว่างภายในอะตอมเริ่มต้นสัมพัทธ์ N_i^X

$$\omega_X = \sum_{i=1}^k N_i^X V_i^X \quad (2.13)$$

เมื่อ V_i^X เป็นจำนวนของรังสีเอ็กซ์เฉพาะทั้งหมดต่อที่ว่างภายในอะตอมเริ่มต้นในชั้นพลังงานย่อย X_i การแปลความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ (V_i^X) และการเรืองรังสีเอ็กซ์ของระดับพลังงานย่อย (ω_i^X) จากสมการ (2.10) ถึงสมการ (2.12)

ระหว่างค่าผลที่ได้จากการเรือง (ω_i^X) กับผลที่ได้จาก Auger (a_i^X) และที่น่าจะเป็นของการเคลื่อนย้ายของ Coster-kroning f_{ij}^X จะต้องเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\omega_i^X + a_i^X + \sum_{i=1}^k f_{ij}^X = 1 \quad (2.14)$$

ผลที่ได้จากค่าเฉลี่ย Auger a_i^X หาได้จาก

$$a_x^- = \sum_{i=1}^k V_i^X a_i^X = 1 \quad (2.15)$$

ในทางปฏิบัติผลการเรืองรังสีเอ็กซ์เป็นฟังก์ชันอยู่เลขอะตอมของธาตุ ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ธาตุที่มีเลขอะตอมในช่วง $12 \leq Z \leq 42$

$$\omega_K = 3.3704 \times 10^{-1} - 6.0047 \times 10^{-2} Z + 3.3133 \times 10^{-3} Z^2 - 3.9251 \times 10^{-5} Z^3 \quad (2.16a)$$

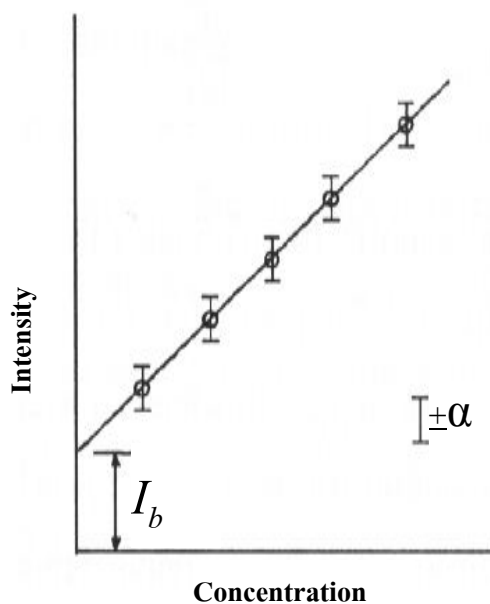
และเลขอะตอมในช่วง $38 \leq Z \leq 79$

$$\omega_{LIII} = 4.41 \times 10^{-2} - 4.7559 \times 10^{-3} Z + 1.1494 \times 10^{-4} Z^2 - 1.8594 \times 10^{-7} Z^3 \quad (2.16b)$$

ต้องย้ำอีกว่าสำหรับธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่า 20 มีผลที่เกิดจากการเรืองรังสีเอ็กซ์ต่ำมากดังนั้นธาตุที่มีเลขอะตอมน้อยจะมีผลการเรืองรังสีเอ็กซ์ต่ำ ซึ่งเป็นขีดจำกัดของวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์ที่ไม่สามารถระบุยอดกราฟของธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่า 20 ได้

2.8.5 วิธีต่างๆในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

- วิธีเทียบกับสารมาตรฐาน วิธีนี้เป็นวิธีที่ธรรมดาที่สุดและเป็นวิธีแรกๆ ที่ผู้ใช้งานมักนึกถึงก่อนวิธีอื่นๆ และเป็นวิธีเดียวกับที่ใช้เครื่องมืออื่นๆเช่นกันวิธีนี้จะมีการสร้างสารมาตรฐานขึ้นอีกมาจำนวนหนึ่ง ในสารมาตรฐานเหล่านี้จะมีธาตุที่ต้องการวิเคราะห์อยู่ในปริมาณที่ทราบแน่นอน หลังจากทำการตรวจวัดสเปกตรัมแล้ว ทำการอ่านค่าความเข้มของยอดกราฟจากรังสีเอ็กซ์ของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์แล้ว นำมาสร้างกราฟซึ่งจะใช้กราฟสำหรับเทียบมาตรฐาน (Calibratio graph) หลังจากนั้นจึงอ่านค่าความเข้มจากยอดกราฟเดียวกันของสารตัวอย่าง

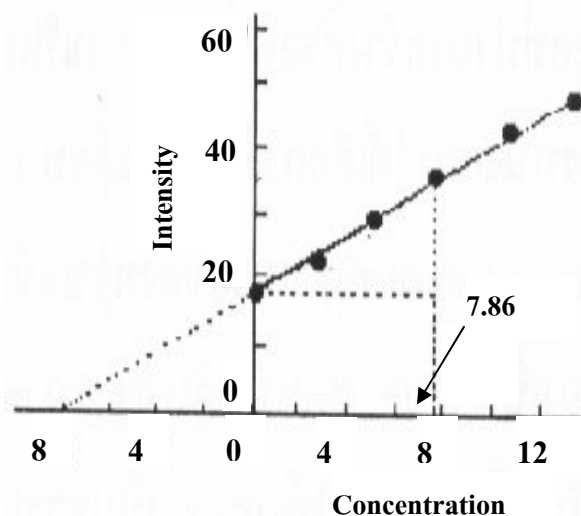


รูปที่ 2.13 แสดงกราฟที่สร้างสำหรับวิธีเทียบมาตรฐาน

ในการสร้างสารมาตรฐานนั้น ต้องใช้สารที่มีลักษณะเนื้อสารคล้ายกับสารตัวอย่างให้มากที่สุด ถ้าเนื้อสารต่างกันจะมีปัญหาผลเมทริกซ์ ทำให้ผลลัพธ์ผิดพลาดจากความเป็นจริง

- วิธีเติมสารมาตรฐาน ในการวิเคราะห์หาปริมาณเชิงธาตุ X ในสารตัวอย่าง สมมุติว่ามีความเข้มข้นเป็น C_x ขั้นแรกแบ่งสารตัวอย่างดังกล่าวมาส่วนหนึ่ง ชั่งให้ทราบน้ำหนักแน่นอน หลังจากนั้นนำมาทำให้อยู่ในรูปร่างที่จะใช้งาน แล้วนำไปตรวจสอบสเปกตรัมอ่านค่าความเข้มข้นของยอดกราฟที่เป็นธาตุ X สมมุติว่าความเข้มรังสีเอ็กซ์เป็น I_x หลังจากนั้นก็แบ่งสารตัวอย่างมาอีกและเติมธาตุ X เพิ่มลงไป ปริมาณที่ทราบแน่นอน สมมุติว่าส่วนที่เพิ่มลงไปนี้เป็น ΔC_x ผสมสารให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วทำให้เป็นรูปร่างเหมือนอันแรก นำไปตรวจวัดสเปกตรัมอ่านค่าความเข้มของยอดกราฟ X เดิมซึ่งควรจะมีค่าเพิ่มขึ้น สมมุติว่าเป็น $I_x + \Delta I_x$ จากนั้นก็สามารถหาค่า C_x ที่ต้องการได้โดยใช้สูตร

$$\frac{I_x}{I_x + \Delta I_x} = \frac{C_x}{C_x + \Delta C_x} \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.14 แสดงตัวอย่างกราฟจากวิธีการเติมสารมาตรฐาน

ถ้าทำการทดลองซ้ำหลายๆ ครั้งโดยใช้ค่า ΔC_x ต่างๆ กันก็มีข้อมูลค่าความเข้มหลายๆ ค่าซึ่งสามารถนำมาสร้างกราฟเพื่อหาค่า C_x ได้แทนการคำนวณจากสูตรข้างต้น

- วิธีทำมาตรฐานภายใน

ต้องการหาค่า C_x ของธาตุ X ในสารตัวอย่างเช่นกัน แต่แทนที่จะเติมธาตุ X เหมือนวิธีข้างต้นแต่วิธีการนี้จะเติมธาตุอื่นแทน ธาตุอื่นที่จะเติมนั้นจะต้องเป็นธาตุที่ไม่อยู่ในข่ายที่ต้องการวิเคราะห์แต่อย่างใดและพิจารณาแล้วเห็นว่ามีเหมาะสมที่จะใช้ได้ สมมุติให้เป็นธาตุ IS หลังจากนั้นจึงเติมธาตุ IS ลงไปในสารตัวอย่างในปริมาณที่แน่นอน สมมุติว่าเท่ากับ C_{IS} ถ้ามีสารตัวอย่างหลายรายการก็เติมธาตุ IS ลงไปทุกรายการในปริมาณเท่าๆ กัน (ปริมาณของ IS จะต้องคงที่) ในทำนองเดียวกันก็สามารถคำนวณค่า C_x ได้จากสูตร

$$\frac{I_x}{I_{IS}} = \frac{C_x}{C_{IS}} \quad (2.18)$$

ข้อดีของวิธีนี้คือ เป็นการชดเชยความแปรปรวนหรือความคลาดเคลื่อนเล็กๆ น้อยๆ ที่อาจเกิดจากเครื่องมือได้ (Instrumental variation or drifts) รวมทั้งตัดผลกระทบที่อาจเกิดจากเมทริกซ์ได้ด้วย (Elimination of matrix influence) ทำให้วิธีนี้สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณได้ถูกต้องอีกวิธีหนึ่ง

- การวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณ (Semiquantitative analysis)

การวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณเป็นวิธีที่เหมาะสม กับเทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์ เพราะข้อได้เปรียบของวิธีการนี้คือ ไม่มีการแปรเปลี่ยนของธาตุหนึ่งไปเป็นอีกธาตุหนึ่ง (มีความเสถียรเกี่ยวกับการระบธาตุได้แน่นอน) เพราะให้กราฟของกระจายรังสีเอ็กซ์ที่ค่อนข้างเรียบ ไม่มีการกระจายของกราฟเมื่อพารามิเตอร์ของเครื่องมือวิเคราะห์เปลี่ยนไป ในปัจจุบันมีคอมพิวเตอร์ที่ช่วยประมวลผลให้ถูกต้องและรวดเร็วยิ่งขึ้น ปริมาณของธาตุที่วิเคราะห์จะเป็นค่าปริมาณอย่างคร่าวๆ เท่านั้น โดยใช้ฐานข้อมูลของเครื่องประมวลผล (Jenkin,1999)

2.8 สรุปปริทรรศน์วรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Murat และ Comel (1983) ศึกษาอุณหภูมิในการเผาดินขาวดิบ โดยทำการทดลองเผาดินขาวดิบด้วยวิธีการเผาแบบถังนิ่ง (Fixed-bed) และแบบถังกวน (Stirred-bed) หรือการเผาแบบหม้อหมุน (Rotary kiln) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาสำหรับทั้ง 2 วิธีอยู่ในช่วง 700 ถึง 850 °C สำหรับวิธีการเผาแบบถังนิ่งเวลาที่เหมาะสมคือ 6 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของดินขาวผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำที่อายุการบ่มระหว่าง 7 ถึง 90 วัน สูงกว่าค่ากำลังอัดของดินขาวจากวิธีการเผาแบบถังกวนซึ่งเวลาที่เหมาะสมในการเผาคือ 3 ชั่วโมง

Kostuch (1993) พบว่าปริมาณดินขาวที่ใช้เพื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้งหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 15 ถึง 20 โดยปริมาณที่เหมาะสมใช้จะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของดินขาว พื้นที่ผิวจำเพาะของดินขาวและปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

Oriol และ Pera (1995) พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และดินขาวในปริมาณร้อยละ 30 ถึง 40 สามารถทำ ปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้งหมดภายในเวลา 28 วัน

Nevill (1996) พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาดินขาวดิบมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินขาวโดยทั่วไปอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 650 ถึง 850 °C

Wild (1996) พบว่าผลกระทบของดินขาวต่อการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต โดยแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวในปริมาณร้อยละ 5 10 15 20 25 และ 30 โดยน้ำหนัก และทำการบ่มในช่วงอายุ 1 ถึง 90 วัน คอนกรีตที่ผสมดินขาวมีกำลังต้านทานแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมในทุกปริมาณของการแทนที่และทุกช่วงอายุของการบ่มโดยปริมาณของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 20 และสรุปว่าการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวเกิดจากผลของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดขึ้นชัดเจนที่สุด

ในช่วง 7 ถึง 14 วันแรก นอกจากนี้ดินขาวยังมีส่วนช่วยในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตในช่วง 24 ชั่วโมงแรกหลังจากการผสม

El-Didamony (2000) ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้แคลเซินวัตุดิบผสมระหว่างดินกับหินปูน และการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบที่ได้หลังการแคลเซิน และใช้ปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระเป็นตัวบ่งชี้ โดยแคลเซินวัตุดิบผสมระหว่างดินและหินปูนในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 50 ต่อ 50 60 ต่อ 40 และ 70 ต่อ 30 ที่ 700 800 900 และ 1000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของผลผลิตที่ได้หลังการแคลเซิน พบว่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระของทั้ง 3 อัตราส่วนวัตุดิบผสมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการแคลเซินจนถึง 800°C เนื่องจากเกิดการแตกตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต ปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระจึงเพิ่มขึ้น และจะมีค่าลดลงเมื่อแคลเซินจนถึง 1000°C เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์กับซิลิกาและอลูมินา และในอัตราส่วนวัตุดิบ 50 ต่อ 50 จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์มากกว่าอีกสองอัตราส่วนในทุกอุณหภูมิการแคลเซิน และจากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของอัตราส่วนวัตุดิบ 60 ต่อ 40 เมื่อแคลเซินที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า ในวัตุดิบผสมประกอบด้วย แคลเซียมคาร์บอเนต ควอตซ์และเคโอลิน เมื่อแคลเซินวัตุดิบผสมที่ 800°C จะเกิดการแตกตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตอย่างสมบูรณ์ให้ได้แคลเซียมออกไซด์ และเริ่มมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้น ที่ 900°C เกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์กับอลูมิโนซิลิเกตที่อยู่ในรูปผลึกแบบอสัณฐานเกิดสารประกอบใหม่ คือ Gehlenite และเมื่อที่ 1000°C ความเป็นผลึกของ Gehlenite จะสมบูรณ์มากขึ้น และมีควอตซ์เหลืออยู่ในระบบ เมื่อนำผลผลิตของอัตราส่วนวัตุดิบ 60 ต่อ 40 ที่ถูกเผาที่ 1000°C มาศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยใช้ปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระและปริมาณน้ำในโครงสร้าง (Combined water) เป็นตัวบ่งชี้ พบว่า สารประกอบใหม่หลังเผาที่อายุบ่มเริ่มต้นจนถึง 28 วัน จะไม่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระ เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้นจนถึง 90 วัน จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบใหม่หลังเผากับน้ำและมีแคลเซียมออกไซด์เกิดขึ้น และปริมาณน้ำที่อยู่ในโครงสร้างมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นชนิดแคลเซียมอลูมิโนซิลิเกต เช่น Gehlenite มีคุณสมบัติทางไฮดรอลิกน้อย ทำให้มีปริมาณน้ำที่อยู่ในโครงสร้างเพียงเล็กน้อย

Sayamipuk (2543) พบว่ามอร์ต้าผสมดินขาวดิบจากแหล่งในประเทศไทยที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนให้กำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าควบคุม ในขณะที่มอร์ต้าที่ผสมดินขาวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น

อนุพงษ์ (2543) ศึกษาสัณฐานภาพและเงื่อนไขที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพของดินขาวดิบในประเทศไทยจาก 3 แหล่ง ได้แก่ แหล่งปราจีนบุรี ระนอง และ ลำปาง โดยนำดินขาวดิบมาเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 700 800 900 และ 1,000°C และแปรผันเวลาในการเผาคือ 4 6 และ 8 ชั่วโมง จากการทดลองเมื่อพิจารณาจากค่าดัชนีกำลัง (Strength activity index) ของมอร์ต้าผสมดินขาวที่ได้จากการเผา พบว่าวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินขาวดิบที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับดินขาวดิบทั้ง 3 แหล่งคือเผาด้วยอุณหภูมิ 800°C อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง โดยมอร์ต้าที่ผสมดินขาว จากแหล่งจังหวัดปราจีนบุรี ให้ค่าดัชนีกำลังสูงที่สุดร้อยละ 131 เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าที่ผสมดินขาวจากแหล่งจังหวัดระนองและลำปางที่ให้ค่าดัชนีกำลังร้อยละ 115 และ 100 ตามลำดับ

Della (2001) พบว่าจากการเตรียมซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าว โดยนำแกลบข้าวไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีก่อนเผาด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 72.10 หลังจากนั้น ได้นำแกลบข้าว ไปเผาที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าในเถ้าแกลบข้าวมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 94.95 และเมื่อนำเถ้าแกลบไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าซิลิกาที่ได้มีโครงสร้างเป็นแบบออสันฐาน

Procto (2001) ศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบของแกลบ พบว่า ในข้าวแกลบมีปริมาณของซิลิกาสูงร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก และเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่ำการจัดเรียงตัวของซิลิกาจะอยู่ในรูปออสันฐานและเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น ความเป็นผลึกและความบริสุทธิ์ของซิลิกามีค่ามากขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้เผา นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเผาเถ้าแกลบที่อุณหภูมิสูงกว่า 500°C ซิลิกาในข้าวแกลบจะมีเฟสของไตรดีไมท์ (Tridymite)

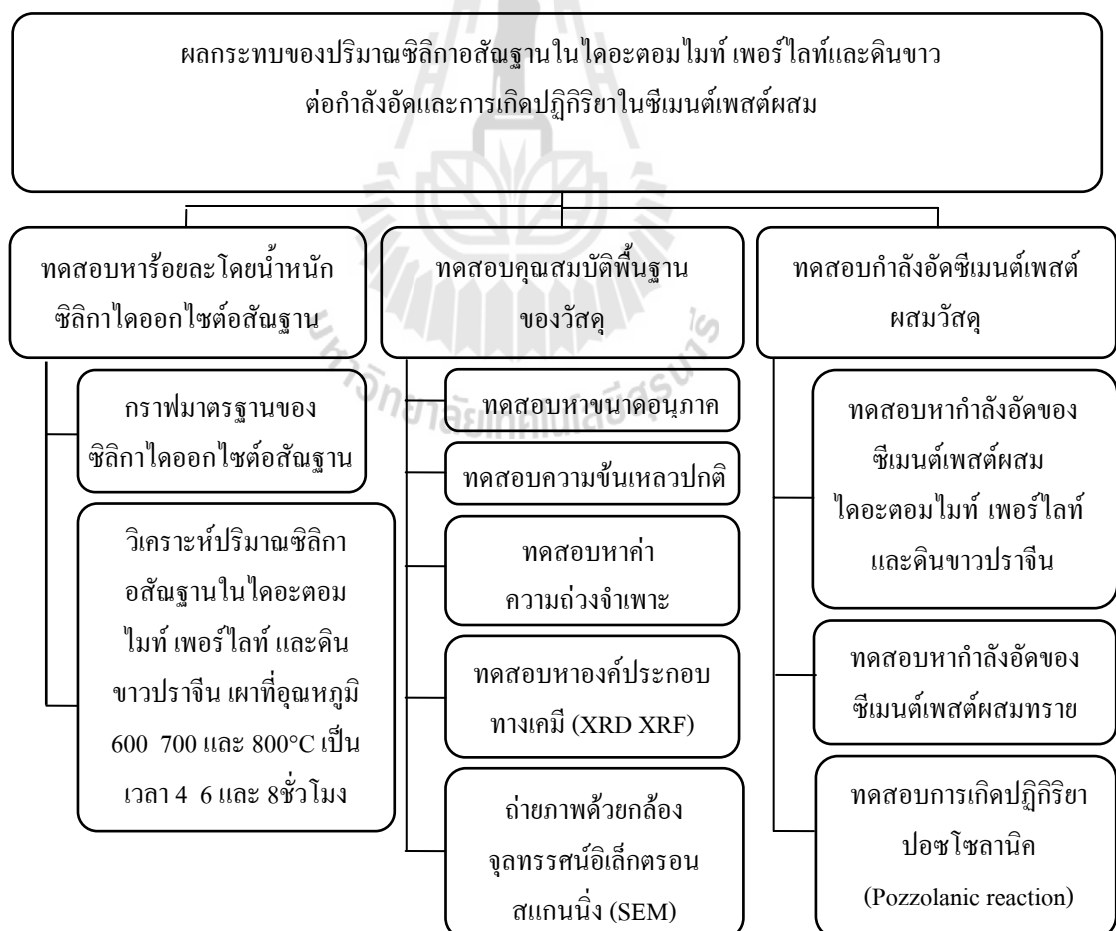
Souza (2001) ศึกษาหากระบวนการที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาจากแกลบ โดยนำแกลบไปต้มในกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 20 และกรดซัลฟูริกร้อยละ 20 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำแกลบไปเผาที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าซิลิกาที่ได้มีโครงสร้างเป็นออสันฐาน เมื่อวิเคราะห์ปริมาณซิลิกาที่ได้ พบว่าเถ้าแกลบที่ได้ซิลิกาเป็นองค์ประกอบในปริมาณร้อยละ 99.69 โดยน้ำหนัก

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

- 1) ทดสอบหาปริมาณซิลิกาอสัณฐานในไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และ ดินขาวปราจีน ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 °C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง โดยวิธีวิเคราะห์โดยเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน
- 2) การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุ
- 3) ทดสอบกำลังอัดซีเมนต์ผสมของวัสดุ



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยใช้วัสดุที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland cement Ttype I)

3.1.2 ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica)

3.1.3 ซิลิกาผลึก (Crystals silica)

3.1.4 อลูมินาออกไซด์ (Aluminadioxide)

3.1.5 ไดอะตอมไมท์ (Diatomite)

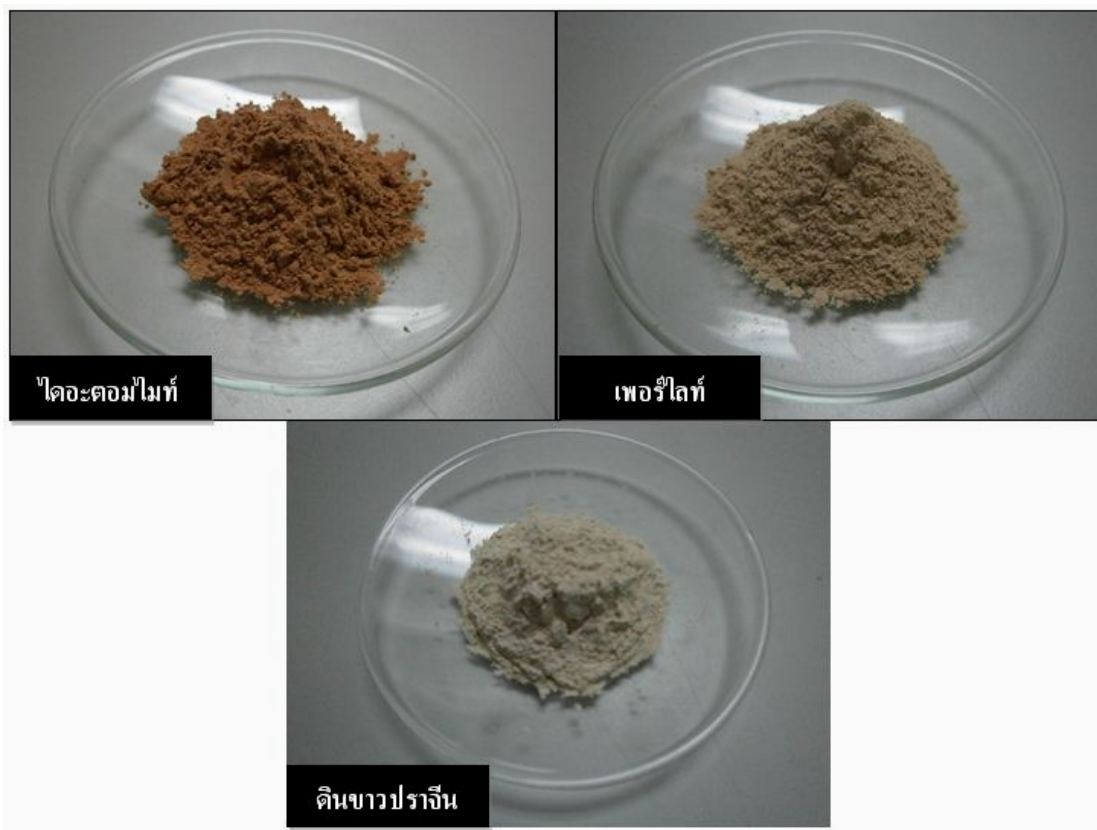
3.1.6 เพอร์ไลต์ (Perlite)

3.1.7 ดินขาวปราจีน

3.1.8 ทราชม้วนน้ำ ซึ่งมีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 (2008) นำทรายมาล้างให้สะอาดเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆออก นำทรายที่เปียกมาผึ่งแดดให้แห้งแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 16 30 50 100 200 และ Pan เพื่อคัดขนาด



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายสารมาตรฐานจากภายนอก



รูปที่ 3.3 ภาพวัสดุปลูกโซลันที่ใช้ในงานวิจัย



ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

ข้อมูลวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	สัญลักษณ์
ดินขาวปราจีนผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง	KT700T8
ดินขาวปราจีนผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง	KT800T4
ดินขาวปราจีนผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง	KT800T6
ดินขาวปราจีนผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง	KT800T8
ซิลิกาไดออกไซด์อสัณฐาน : ซิลิกาไดออกไซด์ผลึก : อลูมินาออกไซด์	AM : C : Al
ส่วนผสมตัวอย่าง : อลูมินาออกไซด์	S : Al
กำลังอัดของปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยวัสดุทดสอบร้อยละ 20 ที่ 28 วัน	A
กำลังอัดของปูนซีเมนต์แทนที่ทรายทดสอบร้อยละ 20 ที่ 28 วัน	B

3.3 การทดสอบหาปริมาณซิลิกาอสัณฐานในไออะตอมไมท์ เฟอร์ไลต์ และดินขาวปราจีน โดยวิธีวิเคราะห์โดยรังสีเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน

3.3.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของซิลิกาไดออกไซด์อสัณฐาน

จุดประสงค์ของการทดสอบ คือ เพื่อหาสมการแสดงร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาไดออกไซด์อสัณฐานจากกราฟมาตรฐาน การสร้างกราฟมาตรฐานนั้นทำโดยผสมชุดผสมระหว่างสาร 3 ชนิด ได้แก่ ซิลิกาไดออกไซด์อสัณฐาน (Amorphous silica) ซิลิกาไดออกไซด์ผลึก (Silica crystals) และอลูมินาออกไซด์ (Alumina oxide) โดยผสมซิลิกาไดออกไซด์อสัณฐานมีค่าความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ซิลิกาไดออกไซด์ผลึกมีค่าความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 และ อลูมินาออกไซด์มีค่าความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ในอัตราส่วน AM : C : Al (Amorphous silica : Silica crystal : Alumina) โดยทำการควบคุมให้น้ำหนักของอลูมินาออกไซด์คงที่ 2 กรัมและแปรผันน้ำหนักของ AM : C ร้อยละ โดยน้ำหนักดังนี้ 100 : 0 80 : 20 60 : 40 40 : 60 และ 20 : 80 ดังแสดงในตารางที่ 3.1 จากนั้นนำมาวิเคราะห์เอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน แล้วสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟซิลิกาไดออกไซด์อสัณฐานกับพื้นที่ใต้กราฟคิ้วตัวแทนของอลูมินาออกไซด์และร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาไดออกไซด์อสัณฐาน สมการความสัมพันธ์นี้จะเป็นสมการถูกใช้ในการหาร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาไดออกไซด์อสัณฐานในไออะตอมไมท์ เฟอร์ไลต์ และดินขาวปราจีน ต่อไป

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมระหว่างซิลิกาไดออกไซด์อสังฐาน ซิลิกาไดออกไซด์ผลึก และอลูมินาออกไซด์ (AM : C : AI)

อัตราส่วน (AM : C) (%)	ซิลิกาอสังฐาน (g)	ซิลิกาผลึก (g)	อลูมินาออกไซด์ (g)	รวม (g)
100 : 0	2	0	2	4
80 : 20	1.6	0.4	2	4
60 : 40	1.2	0.8	2	4
40 : 60	0.8	1.2	2	4
20 : 80	0.4	1.6	2	4





รูปที่ 3.4 เครื่อง X-ray diffraction analysis



รูปที่ 3.5 เครื่องชั่งเทคนิคสามตำแหน่ง

3.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณซิลิกาไดออกไซด์มาตรฐาน

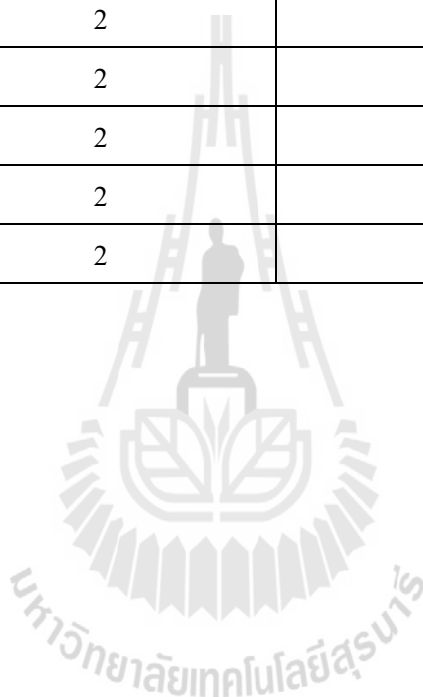
จุดประสงค์ของการทดสอบ คือ เพื่อนำหาค่า Intensity ในไดอะแกรมไมท์เพอร์ไลท์ และคินขาวปราจีน ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง ทดสอบโดยผสมชุดผสมระหว่างตัวอย่างที่ต้องการทดสอบกับอลูมินาออกไซด์(S : Al) ในทุกอัตราส่วน 2 : 2 ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ค่า Intensity ที่ได้จากของผสมดังกล่าว นำไปแทนค่าลงในสมการมาตรฐาน เพื่อหาค่าร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาไดออกไซด์มาตรฐาน

ตารางที่ 3.3 แสดงอัตราส่วนผสมระหว่างตัวอย่างทดสอบกับอลูมินาออกไซด์ (S : Al)

ชนิด	น้ำหนักตัวอย่างทดสอบ (g)	น้ำหนักอลูมินาออกไซด์ (g)	น้ำหนักรวม (g)
DT600T4	2	2	4
DT600T6	2	2	4
DT600T8	2	2	4
DT700T4	2	2	4
DT700T6	2	2	4
DT700T8	2	2	4
DT800T4	2	2	4
DT800T6	2	2	4
DT800T8	2	2	4
PT600T4	2	2	4
PT600T6	2	2	4
PT600T8	2	2	4
PT700T4	2	2	4
PT700T6	2	2	4
PT700T8	2	2	4
PT800T4	2	2	4
PT800T6	2	2	4
PT800T8	2	2	4

ตารางที่ 3.3 แสดงอัตราส่วนผสมระหว่างตัวอย่างทดสอบกับอลูมินาออกไซด์ (S : Al) (ต่อ)

ชนิด	น้ำหนักตัวอย่างทดสอบ (g.)	น้ำหนักอลูมินาออกไซด์ (g.)	น้ำหนักรวม (g.)
KT600T8	2	2	4
KT600T4	2	2	4
KT600T6	2	2	4
KT700T4	2	2	4
KT700T6	2	2	4
KT700T8	2	2	4
KT800T4	2	2	4
KT800T6	2	2	4
KT800T8	2	2	4



3.4 การทดสอบหาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ของไดอะตอมไมท์ เพลอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน

3.4.1 ทดสอบหาขนาดอนุภาคโดยใช้เครื่อง Laser particle size analyzer

จุดประสงค์ของการทดสอบ คือ เพื่อควบคุมขนาดอนุภาคของไดอะตอมไมท์ เพลอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน ให้มีขนาดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์เป็นการลดผลของกำลังอัดเนื่องจากขนาดคละ (Fill effect) ของวัสดุทำการวิเคราะห์การกระจายของอนุภาคทำการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์(Laser particle size analyzer) ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (Laser particle size analyzer)

3.4.2 ทดสอบหาความชื้นเหลวปกติ (Normal consistency of hydraulic cement)

จุดประสงค์ของการทดสอบ คือ เพื่อหาปริมาณน้ำที่ใช้ผสมลงในซีเมนต์เพสต์ผสม ไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผา ที่ทำให้เกิดสภาวะความชื้นเหลวมาตรฐานคงที่โดยใช้ชุดการทดสอบไวแคต (Vicat apparatus) ทำตามมาตรฐาน ASTM C 187



รูปที่ 3.7 ชุดการทดสอบไวแคต (Vicat apparatus)

3.4.3 ทดสอบหองค์ประกอบทางเคมี

จุดประสงค์เพื่อทราบองค์ประกอบเคมีของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน สามารถแบ่งประเภทของวัสดุปอซโซลานและวิเคราะห์ความเหมาะสมของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีนในการนำมาเป็นวัสดุในการวิเคราะห์ปริมาณซิลิกาอสังฐาน การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีใช้เครื่อง X-ray fluorescence

3.4.4 ถ่ายภาพขยายกำลังสูง

จุดประสงค์เพื่อทราบลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)

3.5 การทดสอบกำลังผสมวัสดุ

3.5.1 ทดสอบหาดัชนีกำลังของไออะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน โดยได้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง ด้วยเตาเผาสามารถเผาได้ไม่เกิน 1200°C แทนที่ร้อยละ 20 ของปูนซีเมนต์

จุดประสงค์ของการทดสอบ คือ เพื่อหากำลังอัดของวัสดุ ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของวัสดุและเพื่อเทียบหาค่ากำลังอัดที่ใช้ไออะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผา แล้วเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างควบคุมโดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 311

ตารางที่ 3.4 จำนวนตัวอย่างทดสอบดัชนีกำลังอัดผสมวัสดุ

ชนิด	จำนวนตัวอย่างที่อายุการบ่ม (ก้อน)			รวม (ก้อน)
	3 (วัน)	28 (วัน)	60 (วัน)	
DT600T4	6	6	6	18
DT600T6	6	6	6	18
DT600T8	6	6	6	18
DT700T4	6	6	6	18
DT700T6	6	6	6	18
DT700T8	6	6	6	18
DT800T4	6	6	6	18
DT800T6	6	6	6	18
DT800T8	6	6	6	18
PT600T4	6	6	6	18
PT600T6	6	6	6	18
PT600T8	6	6	6	18
PT700T4	6	6	6	18
PT700T6	6	6	6	18
PT700T8	6	6	6	18
KT600T6	6	6	6	18
PT800T4	6	6	6	18
PT800T6	6	6	6	18

ตารางที่ 3.4 จำนวนตัวอย่างทดสอบดัชนีกำลังอัดผสมวัสดุ (ต่อ)

ชนิด	จำนวนตัวอย่างที่อายุการบ่ม (ก้อน)			รวม (ก้อน)
	3 (วัน)	28 (วัน)	60 (วัน)	
PT800T8	6	6	6	18
KT600T4	6	6	6	18
KT600T8	6	6	6	18
KT700T4	6	6	6	18
KT700T6	6	6	6	18
KT700T8	6	6	6	18
KT800T4	6	6	6	18
KT800T6	6	6	6	18
KT800T8	6	6	6	18
รวมตัวอย่างทั้งสิ้น				486

3.5.2 ทดสอบหาดัชนีกำลังของซีเมนต์เพสต์ควมและซีเมนต์เพสต์แทนที่ด้วยทราย

จุดประสงค์ของการทดสอบ คือ เพื่อหากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควมและซีเมนต์เพสต์ผสมทราย ซีเมนต์เพสต์ควมเพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมในการเป็นวัสดุปอซโซลานของวัสดุทดสอบ ในส่วนของซีเมนต์เพสต์ผสมทรายใช้เพื่อทดสอบหาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานโดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 311

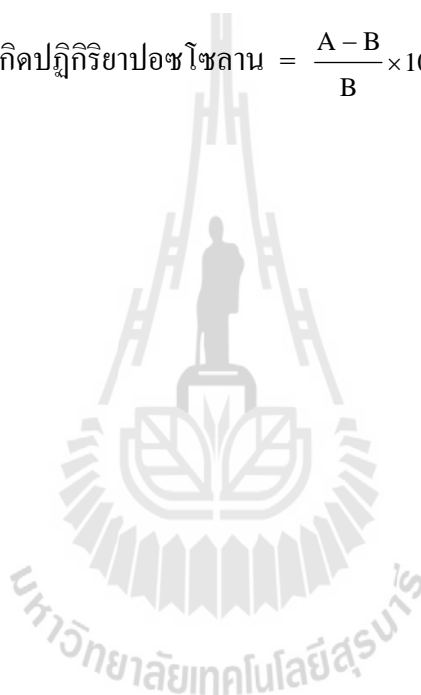
ตารางที่ 3.5 จำนวนตัวอย่างที่ใช้การทดสอบดัชนีกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์เพสต์แทนที่ด้วยทราย

ชนิด	จำนวนตัวอย่างที่อายุการบ่ม (ก้อน)			รวม (ก้อน)
	3 (วัน)	28 (วัน)	60 (วัน)	
Control	6	6	6	18
Sand	6	6	6	18
รวมตัวอย่างทั้งสิ้น				36

3.5.3 ทดสอบการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน

จุดประสงค์ของการทดสอบ คือ เพื่อหาร้อยละของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ปฏิกิริยาปอซโซลาน สามารถหาได้จากการเปรียบเทียบร้อยละผลต่างของซีเมนต์เพสต์ แทนที่ด้วยไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 °C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง ด้วยเตาเผาสามารถเผาได้ไม่เกิน 1200 °C แทนที่ร้อยละ 20 ของปูนซีเมนต์ กับซีเมนต์เพสต์แทนที่ด้วยทรายร้อยละ 20 ของปูนซีเมนต์ โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน

$$\text{ร้อยละของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน} = \frac{A - B}{B} \times 100 \quad (3.1)$$



บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาคูณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ผลการศึกษาปริมาณซิลิกาอสัณฐาน ผลการศึกษากำลังอัด และผลการศึกษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ของซีเมนต์เพสต์ผสมไดอะทอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง ที่อายุการบ่มต่างๆ

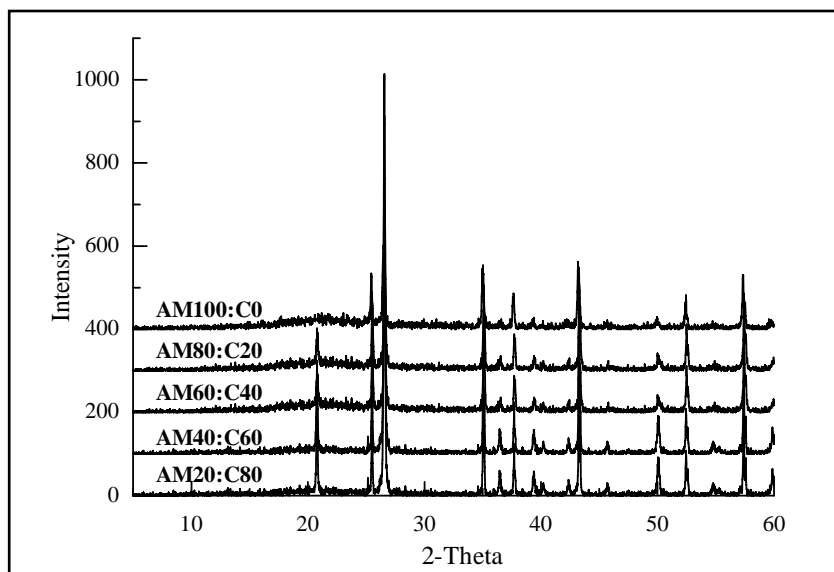
4.1 ผลของร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน

4.1.1 กราฟมาตรฐานของซิลิกาไดออกไซด์อสัณฐาน

ผลการทดสอบซิลิกาไดออกไซด์อสัณฐาน สร้างกราฟมาตรฐานของซิลิกาไดออกไซด์อสัณฐาน โดยวิธีการวิเคราะห์สารประกอบด้วยรังสีเอ็กซ์เรย์โดยใช้สารมาตรฐานภายนอกด้วยเครื่อง X-ray diffraction analysis (XRD) พบว่าเมื่อผสมซิลิกาไดออกไซด์อสัณฐานลงไป ในอัตราส่วนร้อยละปริมาณที่เพิ่มขึ้น Intensity ของซิลิกาอสัณฐานสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยที่อัตราส่วนซิลิกาอสัณฐานที่ร้อยละโดยน้ำหนัก 100 80 60 40 20 และ 0 มี Intensity 13.58 12.75 11.30 9.73 7.15 และ 0 ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดง Intensity ของซิลิกาอสัณฐาน และอลูมินา

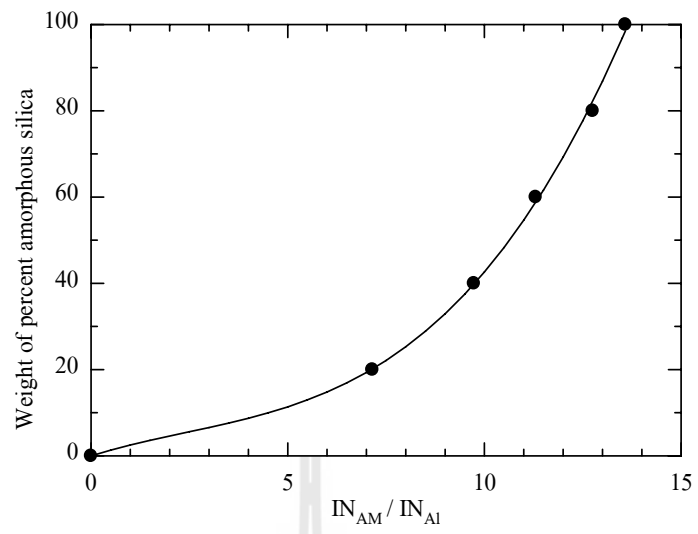
อัตราส่วน (AM:C) (%)	Intensity ซิลิกาอสัณฐาน	Intensity อลูมินาออกไซด์	อัตราส่วนซิลิกาอสัณฐาน ต่ออลูมินาออกไซด์
100 : 0	184.410	13.58	13.58
80 : 20	173.145	13.58	12.75
60 : 40	153.454	13.58	11.30
40 : 60	132.133	13.58	9.73
20 : 80	97.097	13.58	7.15
0 : 100	0	13.58	0



รูปที่ 4.1 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของสารมาตรฐานจากภายนอก

จากตารางที่ 4.1 เมื่อนำความสัมพันธ์ของกลุ่มอันดับอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินาออกไซด์และร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาต่อมาตรฐานจะได้กราฟดังรูปที่ 4.2 กราฟมีลักษณะเป็นโค้งหงาย ที่ร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาต่อมาตรฐานที่ 0 ถึง 40 ความชันค่อนข้างน้อยแต่จะเพิ่มมากขึ้นในช่วงร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาต่อมาตรฐานที่ 40 ถึง 100 แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของ Intensity ในช่วงต้นซึ่งอยู่ระหว่าง 0-9.73 ค่าร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาต่อมาตรฐานจะค่อยเป็นค่อยไปแต่หากค่า Intensity ในช่วงปลายซึ่งอยู่ระหว่าง 9.73-13.58 ค่าร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาต่อมาตรฐานจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับ Intensity ในช่วงต้น ความสัมพันธ์ของกราฟจะอยู่ในรูปของสมการ

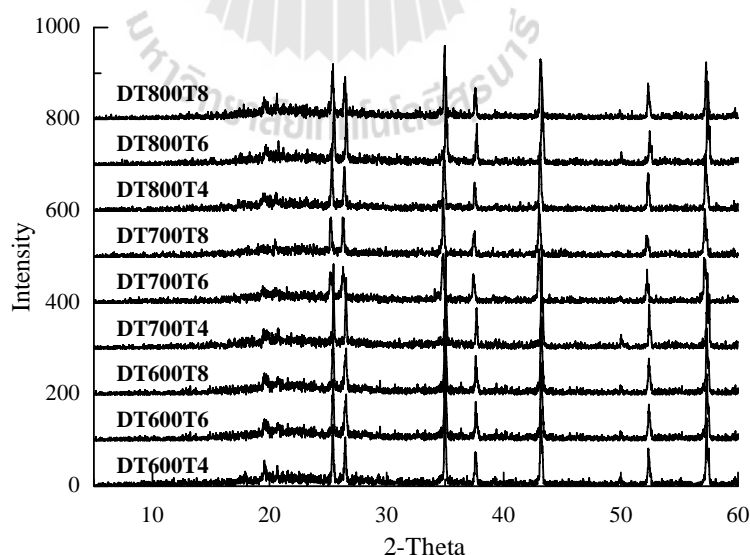
$$y = 0.051X^3 - 0.367X^2 + 2.832X \quad (4.1)$$



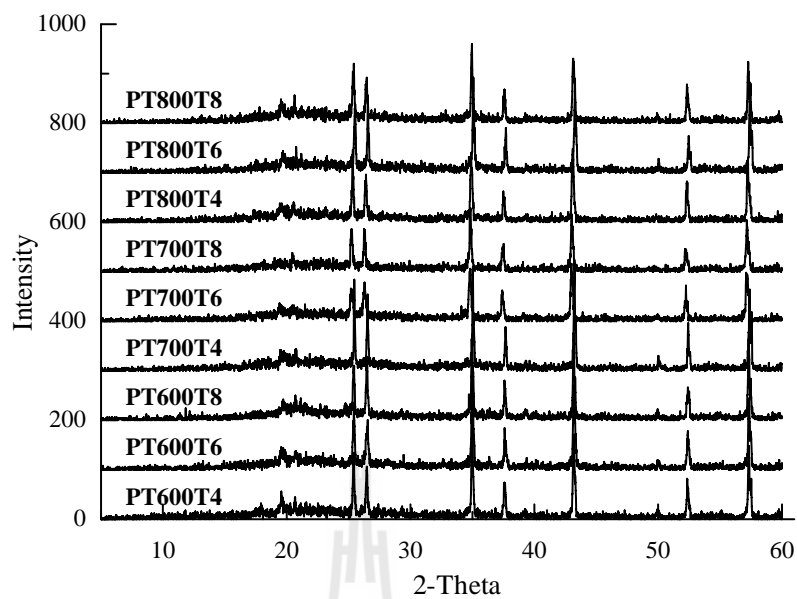
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ weight of percent amorphous silica ต่อ IN_{AM} / IN_{AI}

4.1.2 ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานในไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีน ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง

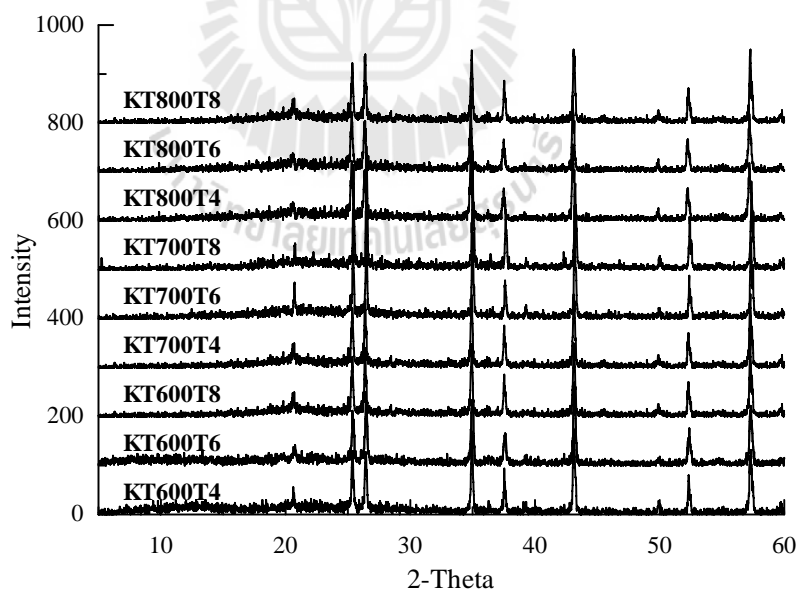
ผลการทดสอบจากรูปที่ 4.3-4.5 แสดงลักษณะ Intensity ที่เปลี่ยนแปลงไปของ ไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์และดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง กราฟของวัสดุแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างของ Intensity ในช่วง 2-Theta ที่ 15-26 ซึ่งเป็นช่วงของซิลิกาอสัณฐานที่ต้องการพิจารณา ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยที่ Intensity ของซิลิกาอสัณฐานที่มีค่ามากที่สุดมีค่าเท่ากับ 152.23 เกิดขึ้นกับเพอร์ไลต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600°C ใช้ระยะเวลาในการเผา 4 ชั่วโมงและ Intensity ของซิลิกาอสัณฐานที่มีค่าต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 27.43 เกิดขึ้นกับดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800°C ใช้ระยะเวลาในการเผา 8 ชั่วโมง ใน ส่วนของ Intensity ตัวแทนของอลูมินาออกไซด์คงที่ทุกตัวอย่างทดสอบเท่ากับ 13.58 การเปลี่ยนแปลงไปของค่า Intensity แต่ละตัวอย่างทดสอบส่งผลต่อปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของ ซิลิกาอสัณฐานกล่าวได้ว่า Intensity ของตัวอย่างทดสอบแปรผันตรงกับปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก ของซิลิกาอสัณฐาน ซึ่งหาได้จากการแทนที่อัตราส่วนผลหารระหว่าง Intensity ของซิลิกาอสัณฐาน กับ Intensity ตัวแทนของอลูมินาในสมการที่ 4.1 ผลของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกา ออสัณฐานในแต่ละตัวอย่างทดสอบแสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.3 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของไดอะตอมไมท์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง



รูปที่ 4.4 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของเพอร์ไลต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง



รูปที่ 4.5 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.2 แสดง Intensity และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานในแต่ละตัวอย่างทดสอบ

ชนิด	Intensity		I_{AM}/I_{Al}	ร้อยละโดยน้ำหนัก ของซิลิกาอสัณฐาน
	AM	Al ₂ O ₃		
DT600T4	137.29	13.58	10.11	43.82
DT600T6	122.08	13.58	8.99	32.85
DT600T8	108.91	13.58	8.02	25.42
DT700T4	102.39	13.58	7.54	22.35
DT700T6	97.23	13.58	7.16	20.18
DT700T8	93.16	13.58	6.86	18.62
DT800T4	85.83	13.58	6.32	16.11
DT800T6	83.79	13.58	6.17	15.48
DT800T8	80.53	13.58	5.93	14.52
PT600T4	152.23	13.58	11.21	57.47
PT600T6	149.92	13.58	11.04	55.16
PT600T8	147.89	13.58	10.89	53.18
PT700T4	146.12	13.58	10.76	51.52
PT700T6	139.47	13.58	10.27	45.62
PT700T8	139.06	13.58	10.24	45.28
PT800T4	137.43	13.58	10.12	43.93
PT800T6	106.06	13.58	7.81	24.03
PT800T8	103.34	13.58	7.61	22.77
KT600T4	79.31	13.58	5.84	14.18
KT600T6	69.80	13.58	5.14	11.79
KT600T8	59.43	13.58	4.376	9.64
KT700T4	46.58	13.58	3.43	7.45
KT700T6	45.86	13.58	3.377	7.34
KT700T8	42.64	13.58	3.14	6.85

ตารางที่ 4.2 แสดง Intensity และปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานในแต่ละตัวอย่าง ทดสอบ (ต่อ)

ชนิด	Intensity		I_{AM}/I_{AI}	ร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน
	AM	Al ₂ O ₃		
KT800T4	38.84	13.58	2.86	6.29
KT800T6	31.91	13.58	2.35	5.29
KT800T8	27.43	13.58	2.02	4.64

4.2 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ไคอะตอมไมท์ เฟอร์ไรท์ และดินขาวปราจีน

จากผลการทดสอบ Laser particle size analyzer ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อทำการควบคุมขนาดอนุภาคของไคอะตอมไมท์ เฟอร์ไรท์ และดินขาวปราจีน อนุภาคมีขนาด 14.38 14.37 และ 14.37 μm ตามลำดับ ขนาดอนุภาคของวัสดุทั้งสามมีขนาดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ การควบคุมขนาดอนุภาคนี้ทำเพื่อลดผลกระทบของการทดสอบกำลังอัดเนื่องจากความสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ก่อให้เกิดความหนาแน่นของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดที่ได้จะไม่เกี่ยวข้องกับผลเนื่องจากขนาดของอนุภาค

จากการทดสอบความขึ้นเหลวปกติของวัสดุด้วยชุดไวแคต (Vicat apparatus) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าไคอะตอมไมท์ เฟอร์ไรท์ และดินขาวปราจีน มีความต้องการน้ำร้อยละ 0.40 0.41 และ 0.42 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ตามลำดับ ความต้องการน้ำของวัสดุทั้งสามไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งการทดสอบความขึ้นเหลวปกตินี้จะนำไปใช้ในการออกแบบส่วนผสมซีเมนต์เพสต์โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ให้คงที่เท่ากันทุกส่วนผสม เพื่อลดผลของกำลังอัดเนื่องจากอัตราส่วนน้ำที่ไม่คงที่

จากการทดสอบความถ่วงจำเพาะของไคอะตอมไมท์ เฟอร์ไรท์ และดินขาวปราจีน พบว่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุทั้งสามชนิดต่ำกว่าปูนซีเมนต์ โดยมีค่าประมาณ 0.74 0.76 และ 0.84 เท่าของปูนซีเมนต์ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุทั้งสามชนิดนี้มีความพรุนสูงกว่าปูนซีเมนต์

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน

คุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	ไคอะตอมไมท์	เพอร์ไลท์	ดินขาวปราจีน
อนุภาคขนาดกลาง	14.50	14.38	14.37	14.37
ความชื้นเหลือปกติ	0.25	0.40	0.41	0.42
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.35	2.40	2.67

4.3 องค์ประกอบทางเคมีของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence analysis (XRF) ดังแสดงในตารางที่ 4.5

4.3.1 สารประกอบหลักในไคอะตอมไมท์

ปริมาณสารประกอบหลัก $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 87.8\%$ ปริมาณ $\text{SO}_3 = 3.33\%$ และค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อน (LOI) 1.56% ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า ไคอะตอมไมท์จัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 (2001) ซึ่งกำหนดให้ปริมาณสารประกอบหลัก $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ จะต้องมีค่ามากกว่า 70% ค่าสูญเสียเนื่องจากความร้อน (LOI) ไม่มากกว่า 10% ค่า SO_3 ไม่มากกว่า 4%

4.3.2 สารประกอบหลักในเพอร์ไลท์

ปริมาณสารประกอบหลัก $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 85.47\%$ ปริมาณ $\text{SO}_3 = 159 \text{ ppm}$. และค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อน (LOI) 8.11% ดังนั้น จึงสามารถกล่าวได้ว่าเพอร์ไลท์จัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N

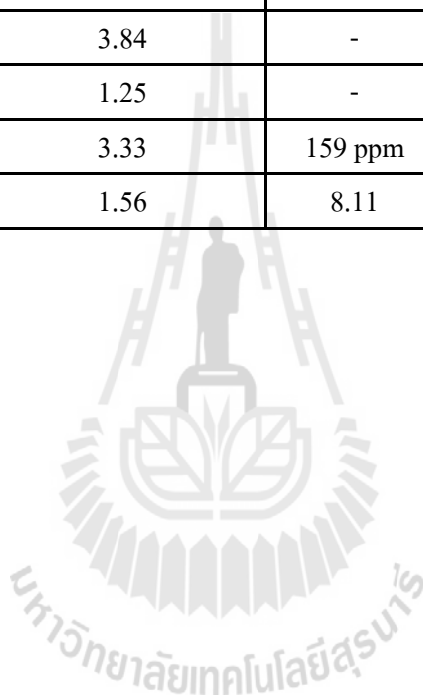
4.3.3 สารประกอบหลักในดินขาวปราจีน

ปริมาณสารประกอบหลัก $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 88.66\%$ ปริมาณ $\text{SO}_3 = 656 \text{ ppm}$. และค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อน (LOI) 9.71% ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าดินขาวปราจีนจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N

จากผลการทดสอบข้างต้น แสดงให้เห็นว่าไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์และดินขาวปราจีน มีองค์ประกอบเคมีตามที่มาตรฐานกำหนด ทั้งยังมีองค์ประกอบของซิลิกาไดออกไซด์ในปริมาณที่มากกว่าครึ่งขององค์ประกอบเคมีทั้งหมด ฉะนั้นแล้วไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์และดินขาวปราจีนจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติสำหรับงานวิจัยเพื่อหาปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาออสันฐาน

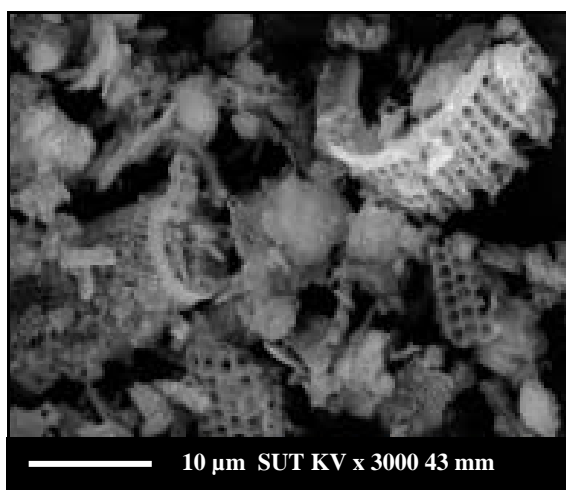
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาว
ปราจีน ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)

ปริมาณออกไซด์ (%)	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	ไคอะตอมไมท์	เพอร์ไลท์	ดินขาวปราจีน
SiO ₂	18.12	59.30	73.31	51.22
Al ₂ O ₃	3.58	10.00	9.35	30.76
Fe ₂ O ₃	3.63	18.50	2.81	6.68
CaO	67.59	1.20	1.76	3324 ppm
K ₂ O	1.8	1.92	10.00	3499 ppm
MgO	3.84	-	-	-
Na ₂ O	1.25	-	-	-
SO ₃	3.33	159 ppm	158 ppm	656 ppm
Loss on Ignition (LOI)	1.56	8.11	1.02	9.71



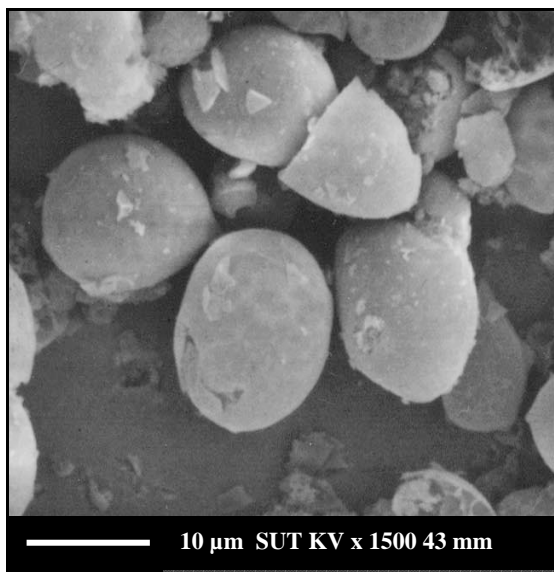
4.4 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน โดยทำการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ถึง 4.8



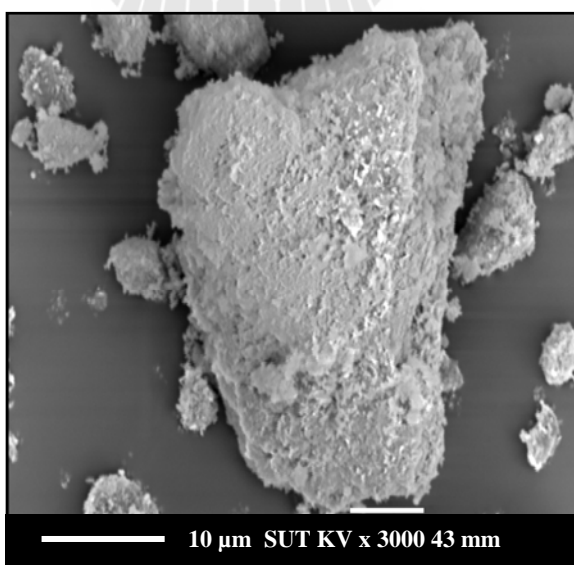
รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมท์

พบว่าไคอะตอมไมท์ที่ไม่ได้ผ่านการเผาหรืออบ มีลักษณะอนุภาคเป็นแท่งทรงกระบอกกลวง มีผนังลักษณะเป็นโครงข่ายที่ค่อนข้างสมบูรณ์และเป็นระเบียบคล้ายรังผึ้งที่มีความพรุนสูงดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ของเพอร์ไลต์

พบว่าเพอร์ไลต์ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเผาหรืออบค มีลักษณะอนุภาคแบบทรงกลมทึบ มีลักษณะเป็นโครงข่าย บางอนุภาคมีลักษณะคล้ายเปลือกไข่ การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM ของดินขาวปราจีน

พบว่า ดินขาวปราจีนที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเผาหรืออบ มีลักษณะอนุภาคไม่แน่นอนส่วนใหญ่เป็นแผ่นมีรูพรุนและเกาะกันเป็นก้อนอย่างหลวมๆ การกระจายตัวและขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 4.7

4.5 คุณสมบัติกำลังอัด

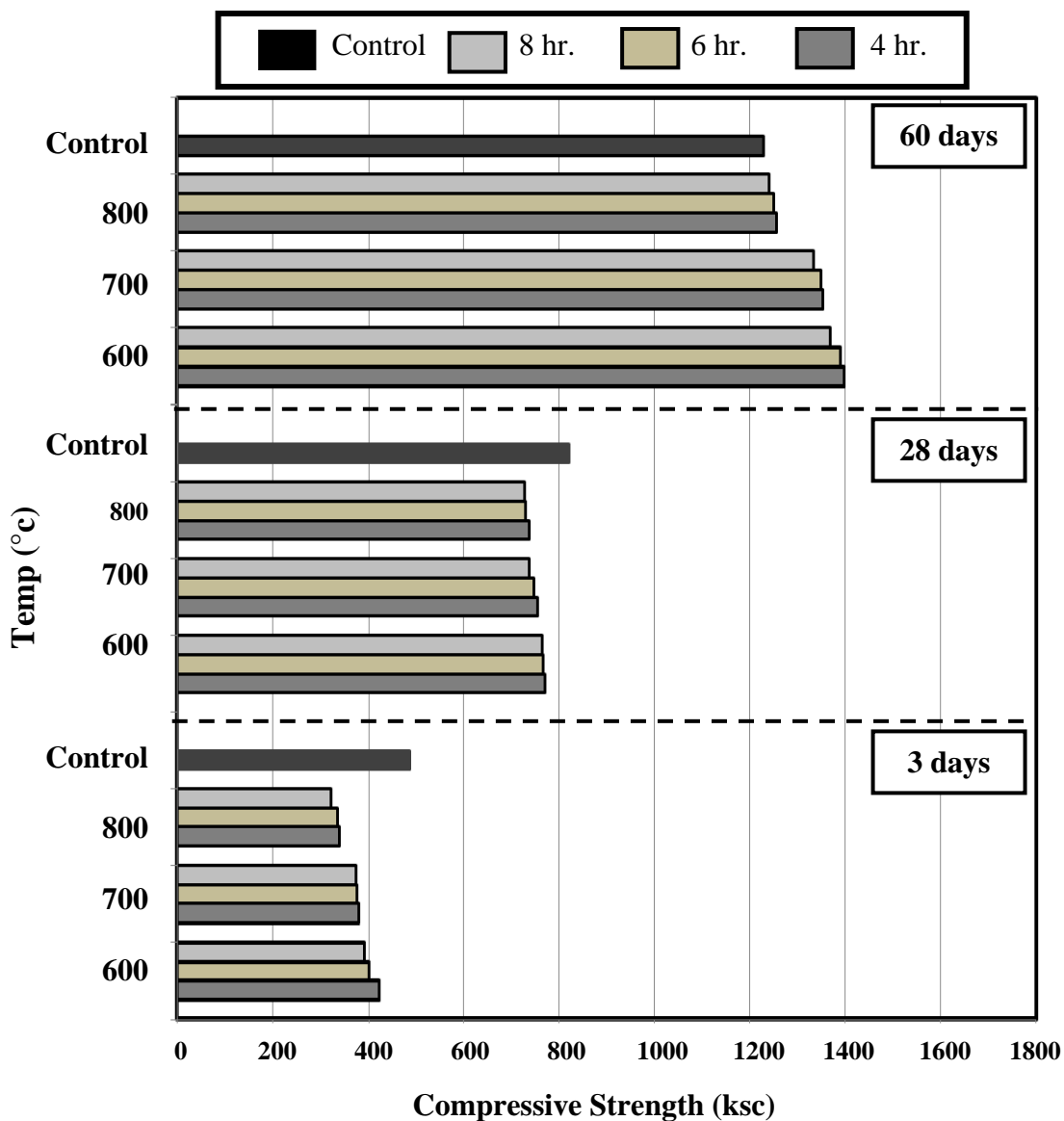
การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน แล้วนำไปผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง แทนที่ร้อยละ 20 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าในการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุม ทำการทดสอบที่อายุการบ่ม 3 28 และ 60 วัน มีกำลังอัด 488.70 820.52 และ 1229.29 kg/cm² ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่ผสมไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิและระยะเวลาเดียวกัน เมื่อพิจารณาที่อายุการทดสอบ 3 วัน กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามซีเมนต์เพสต์ควบคุม แต่ยังคงต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมในทุกๆ ส่วนผสม ส่วนที่อายุทดสอบที่ 28 วัน ซีเมนต์เพสต์ผสม PT600T4 PT600T6 PT600T8 มีกำลังอัด 845.32 836.44 830.78 kg/cm² ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม ส่วนผสมซีเมนต์เพสต์อื่นๆ นั้นมีกำลังอัดน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม และที่อายุทดสอบที่ 60 วัน ซีเมนต์เพสต์ผสมมีกำลังอัดมากกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมในทุกส่วนผสม กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมที่สูงกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมนี้ แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติความเป็นปอซโซลานของวัสดุแต่ละชนิดจะใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานั้นเริ่มต้นที่อายุ 28 วันขึ้นไป

ตารางที่ 4.5 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์เพสต์ผสมไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C ระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง

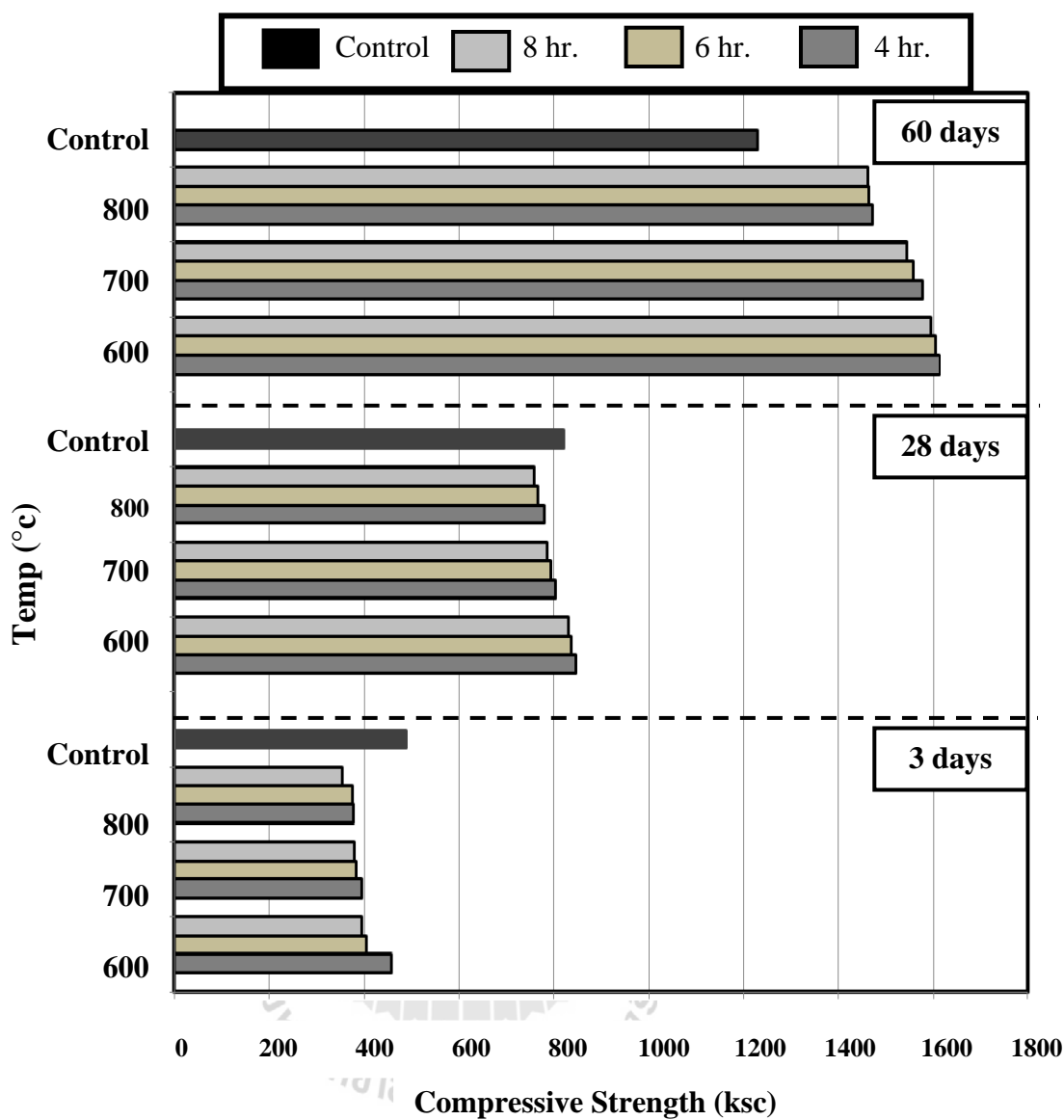
ชนิด	กำลังอัด (kg/cm ²)		
	3 วัน	28 วัน	60 วัน
CEMENT PASTE	488.7	820.52	1229.29
SAND	475.85	719.73	1096.88
DT600T4	421.92	770.5	1317.53
DT600T6	400.96	766.2	1389.03
DT600T8	391.71	765.53	1368.64

ตารางที่ 4.5 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์เพสต์ผสมไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C ระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง (ต่อ)

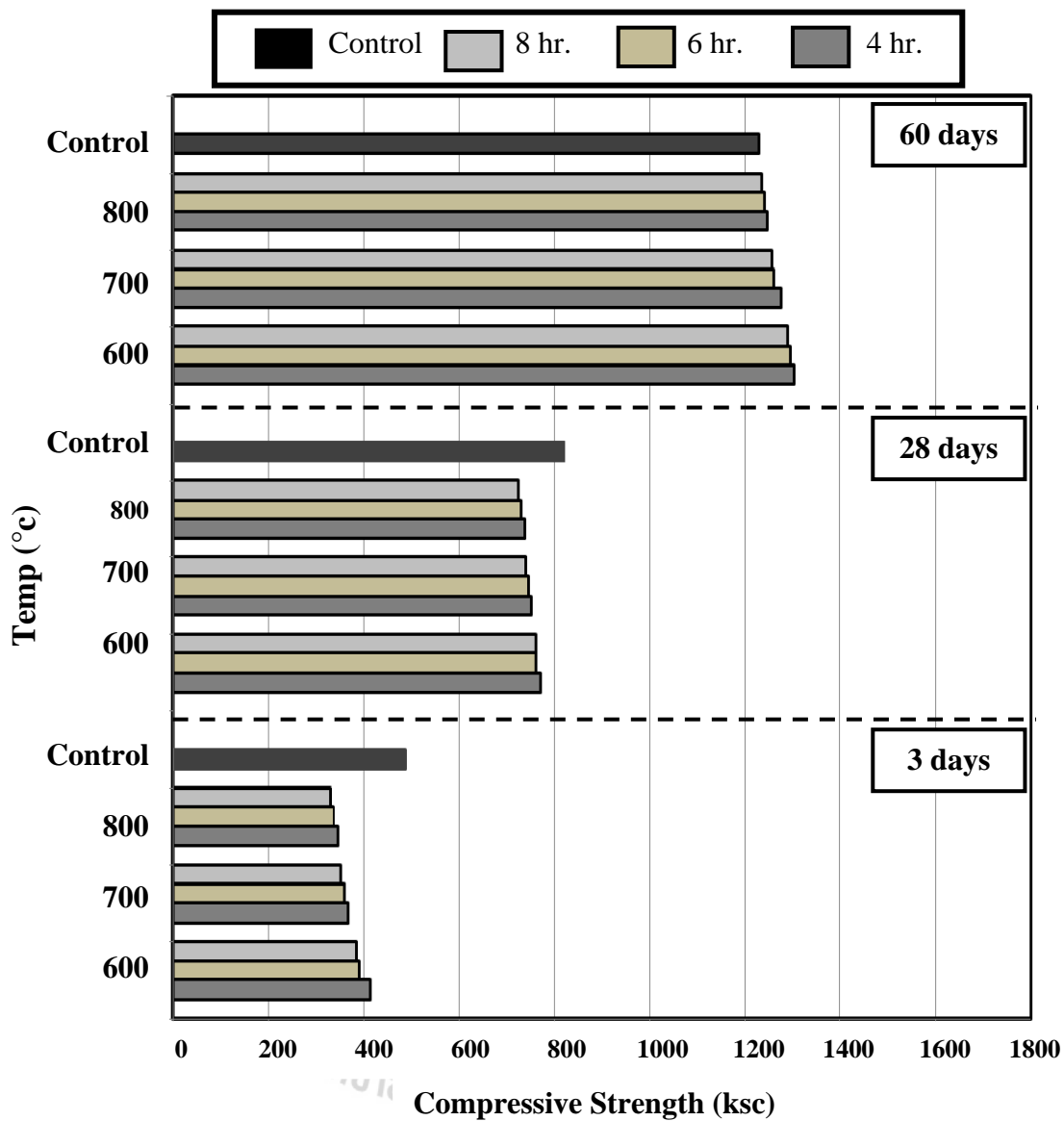
ชนิด	กำลังอัด (kg/cm ²)		
	3 วัน	28 วัน	60 วัน
DT700T4	378.98	755.49	1352.76
DT700T6	376.25	747.93	1349.53
DT700T8	373.67	739.17	1333.91
DT800T4	339.30	737.81	1255.71
DT800T6	335.29	730.52	1249.88
DT800T8	322.53	728.86	1241.32
PT600T4	457.96	845.32	1614.08
PT600T6	404.84	836.44	1604.68
PT600T8	396.12	830.78	1594.64
PT700T4	394.76	803.12	1577.84
PT700T6	382.79	794.27	1557.04
PT700T8	380.64	785.42	1543.6
PT800T4	377.76	779.86	1473.08
PT800T6	376.24	767.55	1465.28
PT800T8	353.76	759.28	1463.2
KT600T4	413.90	770.38	1302.73
KT600T6	391.02	761.09	1294.96
KT600T8	384.84	759.84	1289.61
KT700T4	368.78	751.12	1274.55
KT700T6	360.04	745.66	1260.68
KT700T8	352.19	740.19	1256.93
KT800T4	347.41	737.45	1245.74
KT800T6	336.53	730.15	1239.99
KT800T8	329.37	723.86	1234.79



รูปที่ 4.9 ภาพกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์ผสมไดอะดอมไมท์เผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมงที่อายุการทดสอบ 3 28 และ 60 วัน



รูปที่ 4.10 ภาพกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุมหงและซีเมนต์เพสต์ผสมเพอร์ไลต์เผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง ที่อายุการทดสอบ 3 28 และ 28 วัน



รูปที่ 4.11 ภาพกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์ดินขาวปราจีนเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง ผสมที่อายุการทดสอบ 3 28 และ 60 วัน

4.6 ปฏิกริยาปอชโซลาน

ผลการศึกษาร้อยละการเกิดปฏิกริยาปอชโซลานแสดงในตารางที่ 4.7 ซีเมนต์เพสต์แทนที่ด้วยทรายเป็นตัวแทนของกำลังอัดที่ไม่เกิดปฏิกริยาปอชโซลานมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 719.73 kg/cm^2 ปฏิกริยาปอชโซลานของซีเมนต์เพสต์ผสมตัวอย่างทดสอบจะอยู่ระหว่างร้อยละ 17.45-0.75 ปฏิกริยาปอชโซลานจะเกิดมากที่สุดกับซีเมนต์เพสต์ผสมเพอร์ไลต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600°C ใช้ระยะเวลาในการเผา 4 ชั่วโมง และปฏิกริยาปอชโซลานต่ำที่สุดจะเกิดกับซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800°C ใช้ระยะเวลาในการเผา 8 ชั่วโมงนอกจากนี้ที่อายุทดสอบที่ 28 วัน ซีเมนต์เพสต์ผสมตัวอย่างทดสอบจะเกิดปฏิกริยาปอชโซลานกับทุกส่วนผสม แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดส่วนหนึ่งของซีเมนต์เพสต์ผสมตัวอย่างทดสอบที่อายุทดสอบ 28 วัน เกิดจากปฏิกริยาปอชโซลานขององค์ประกอบเคมีภายในวัสดุแต่ละชนิดแต่การเกิดปฏิกริยาปอชโซลานต้องใช้เวลา เนื่องจากการเกิดปฏิกริยาปอชโซลานนั้นเป็นปฏิกริยาอันดับสอง ต้องอาศัยสารตั้งต้นคือแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกริยา ซึ่งได้จากปฏิกริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และน้ำ

ตารางที่ 4.6 ร้อยละปฏิกริยาปอชโซลานของซีเมนต์เพสต์ผสม

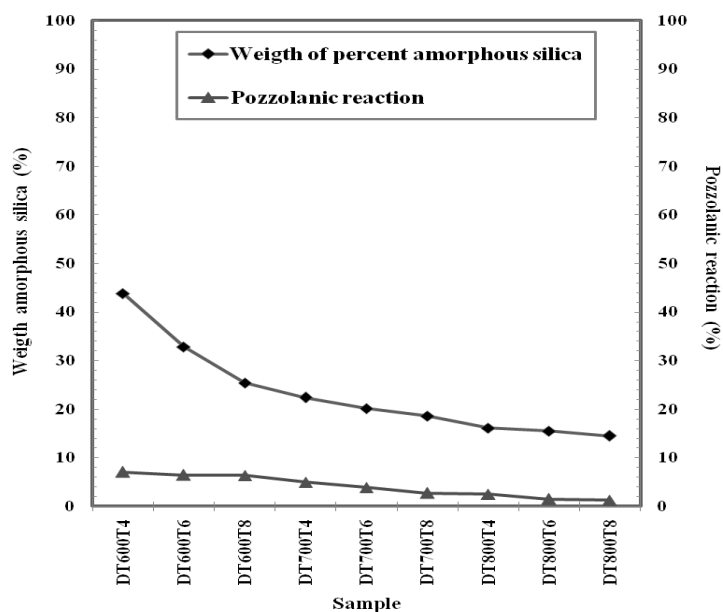
ชนิด	กำลังอัดที่ 28 วัน kg/cm^2	ปฏิกริยาปอชโซลาน (%)
SAND	719.73	0
DT600T4	770.5	7.05
DT600T6	766.2	6.46
DT600T8	765.53	6.36
DT700T4	755.49	4.97
DT700T6	747.93	3.92
DT700T8	739.17	2.70
DT800T4	737.81	2.51
DT800T6	730.52	1.50
DT800T8	728.86	1.27
PT600T4	845.32	17.45
PT600T6	836.44	16.22
PT600T8	830.78	15.43

ตารางที่ 4.6 ร้อยละการเกิดปฏิกิริยาปอชโซลานของซีเมนต์ผสม (ต่อ)

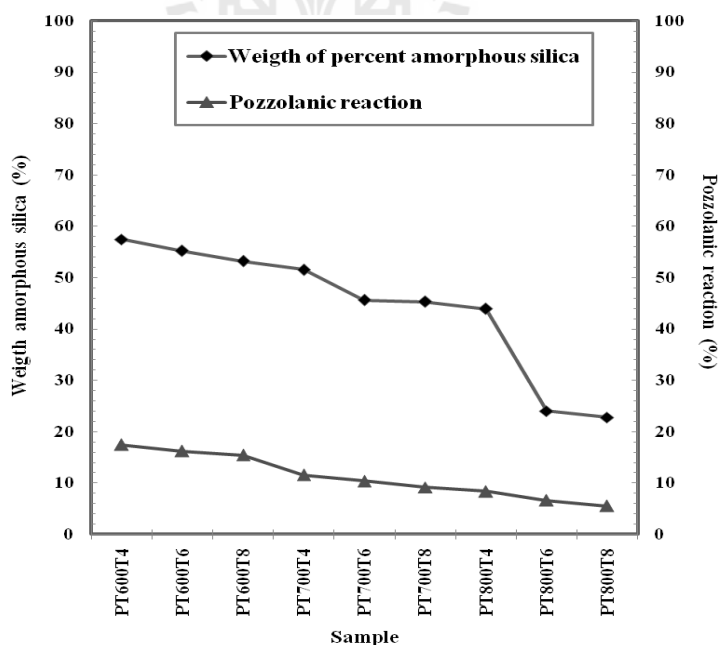
ชนิด	กำลังอัดที่ 28 วัน kg/cm ²	ปฏิกิริยาปอชโซลาน (%)
PT700T4	803.12	11.59
PT700T6	794.27	10.36
PT700T8	785.42	9.13
PT800T4	779.86	8.35
PT800T6	767.55	6.64
PT800T8	759.28	5.50
KT600T4	770.38	7.04
KT600T6	761.09	5.75
KT600T8	759.84	5.57
KT700T4	751.12	4.36
KT700T6	745.66	3.60
KT700T8	740.19	2.84
KT800T4	737.45	2.46
KT800T6	730.15	1.45
KT800T8	723.86	0.57

4.7 ผลของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานต่อปฏิกิริยาปอชโซลานในซีเมนต์ผสม

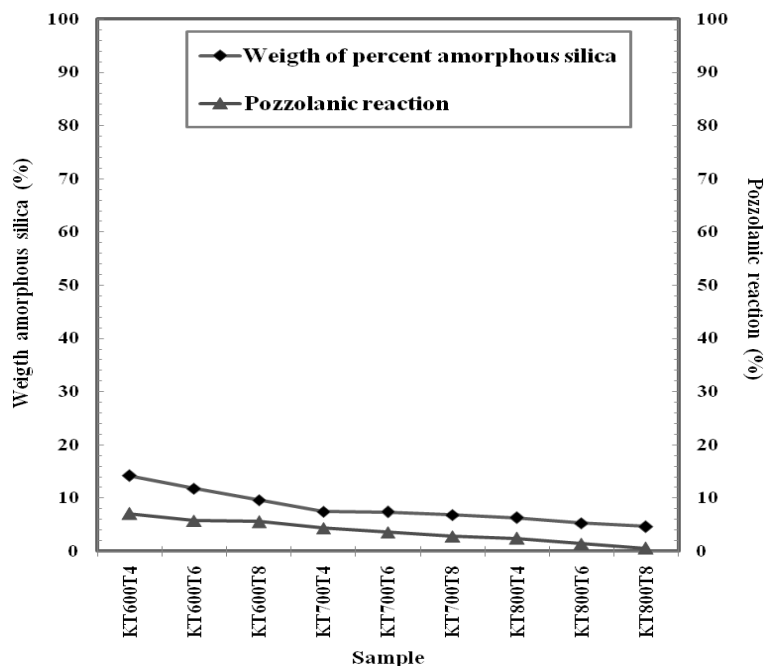
ผลการศึกษาความสัมพันธ์ร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานต่อปฏิกิริยาปอชโซลาน ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าซีเมนต์ผสมเพอร์ไลต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600°C ใช้ระยะเวลาในการเผา 4 ชั่วโมง มีปริมาณซิลิกาอสัณฐานมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 57.47 โดยน้ำหนัก และเกิดปฏิกิริยาปอชโซลานมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 17.45 และซีเมนต์ผสมดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800°C ใช้ระยะเวลาในการเผา 8 ชั่วโมง มีปริมาณซิลิกาอสัณฐานต่ำที่สุดคิดเป็นร้อยละ 14.18 โดยน้ำหนัก และปฏิกิริยาปอชโซลานมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 0.57



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานกับร้อยละปฏิกิริยาปอซโซลานในไคอะตอมไมท์



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานกับร้อยละปฏิกิริยาปอซโซลานในเพอร์ไลท์

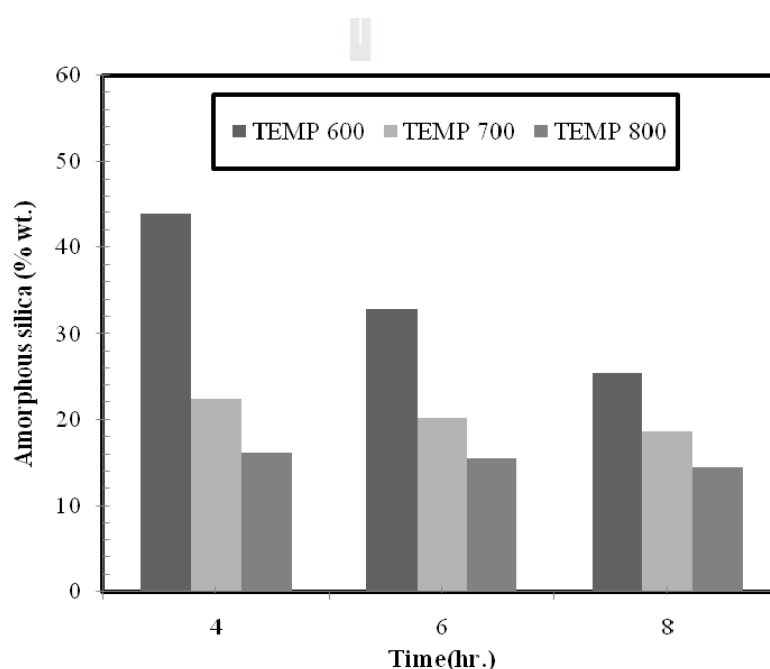


รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานกับร้อยละปฏิกิริยาปอซโซลานในดินขาวปราจีน

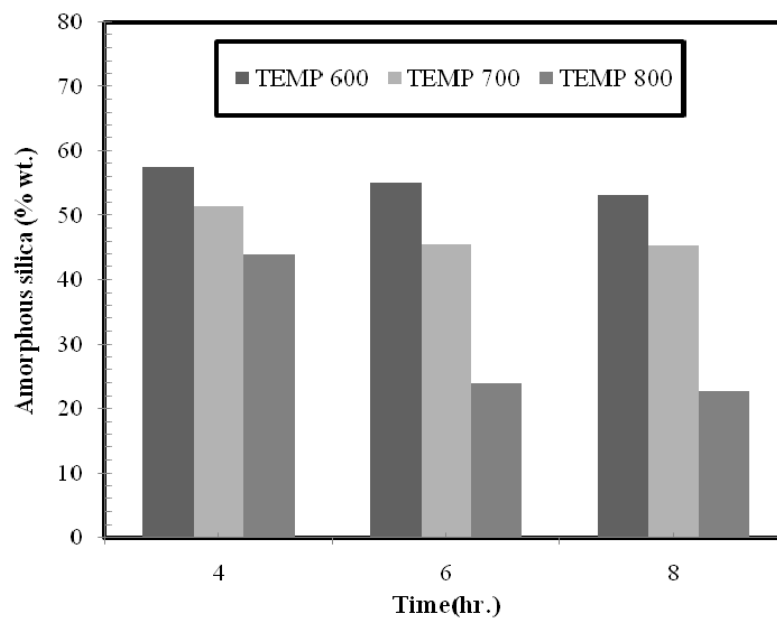
จากรูปที่ 4.12 - 4.14 แสดงให้เห็นว่าผลของเส้นกราฟปริมาณร้อยละซิลิกาอสัณฐานต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือเมื่อปริมาณซิลิกาอสัณฐานลดต่ำลงการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานลดต่ำลงตามไปด้วยหรือปริมาณซิลิกาอสัณฐานจะแปรผันตรงกับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ความสัมพันธ์ของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานคือซิลิกาอสัณฐานจะมีลักษณะเด่นคือมีพื้นที่ผิวจำเพาะและความละเอียดสูงทั้งสองปัจจัยนี้จะเพิ่มความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาได้ของวัสดุทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเร็วและง่ายขึ้น โดยเฉพาะแล้ววัสดุที่มีปริมาณร้อยละซิลิกาอสัณฐานและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมากที่สุดได้แก่ เฟอร์ไรต์ ไคอะตอมไมท์และดินขาวปราจีน ตามลำดับ

4.8 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน

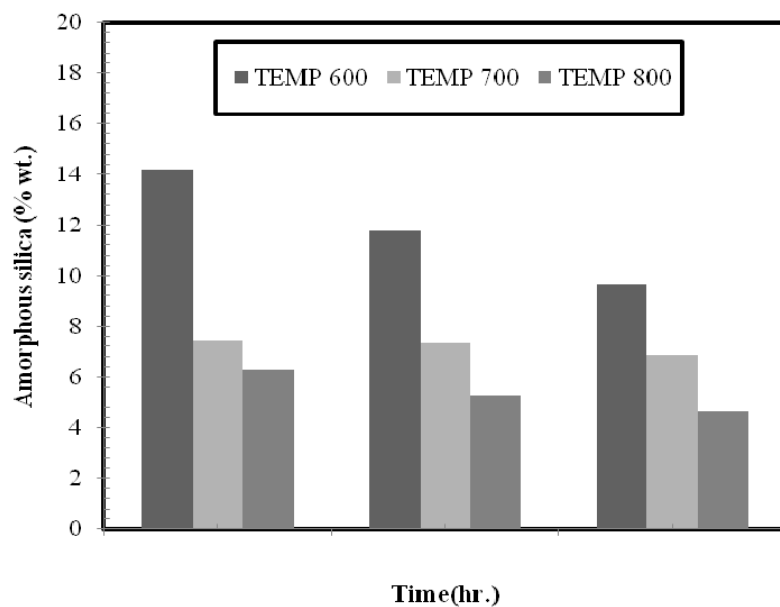
ผลการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานพบว่า เมื่อจำกัดอุณหภูมิที่ใช้เผายู่ระหว่าง 600 700 และ 800°C การเพิ่มสูงขึ้นของอุณหภูมิที่ใช้เผา มีผลทำให้ปริมาณซิลิกาอสัณฐานมีแนวโน้มลดต่ำลง และการลดต่ำลงของปริมาณร้อยละซิลิกาอสัณฐานจะไม่คงที่สม่ำเสมอตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอจะเป็นไปในทิศทางที่ไม่แน่นอนดังแสดงในกราฟที่ 4.15 ถึง 4.17 ซึ่งการลดต่ำลงของปริมาณซิลิกาอสัณฐานจะมีผลโดยตรงกับปฏิกิริยาปอซโซลานจากหัวข้อที่ 4.6



รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาโคอะคอมไมท์ต่อปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน



รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเพอร์ไลต์
ต่อปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน

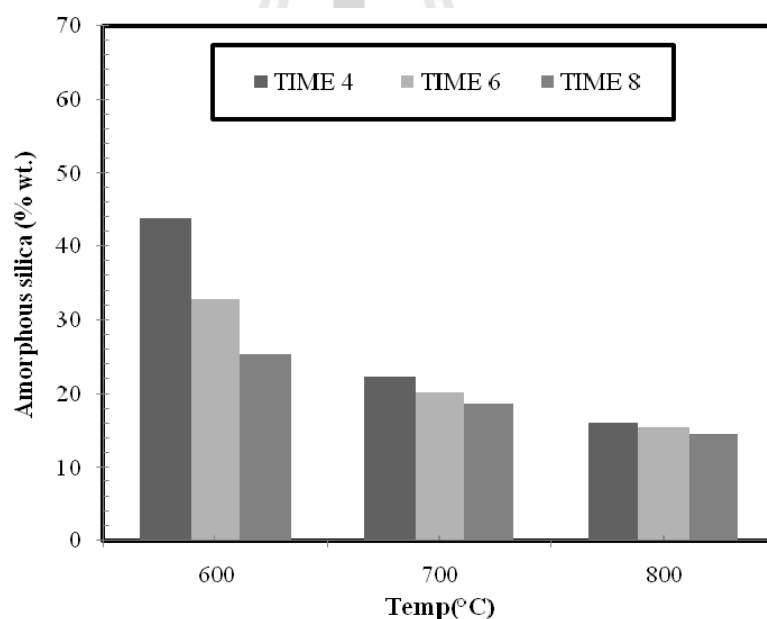


รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาดินขาวปราจีน
ต่อปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน

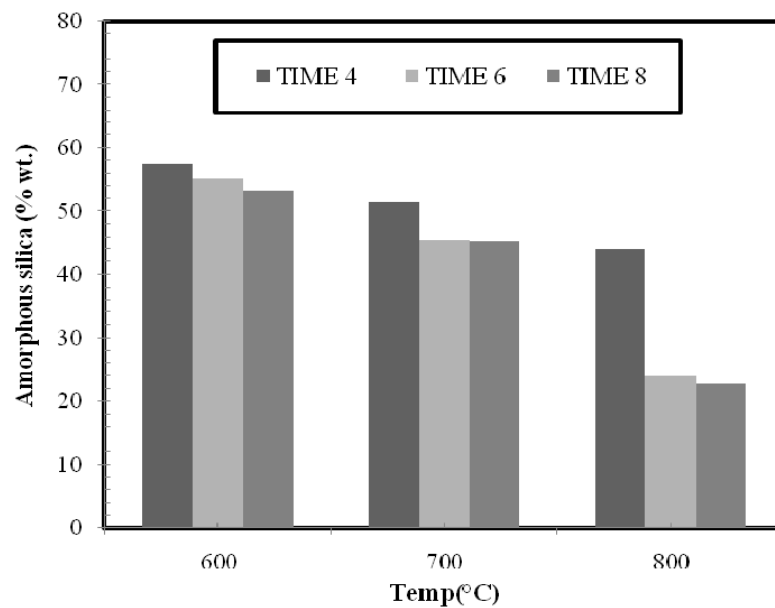
จากรูป 4.15 ถึง 4.17 พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานในวัสดุทั้งสามชนิด แสดงให้เห็นว่าปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานที่เปลี่ยนแปลงไปไม่ขึ้นตรงกับชนิดของวัสดุ แต่แปรผันกับอุณหภูมิที่ใช้ในการการเผา จะอยู่ในลักษณะแปรผกผันกันระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานกับอุณหภูมิ

4.9 ผลของระยะเวลาที่ใช้เผาต่อปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน

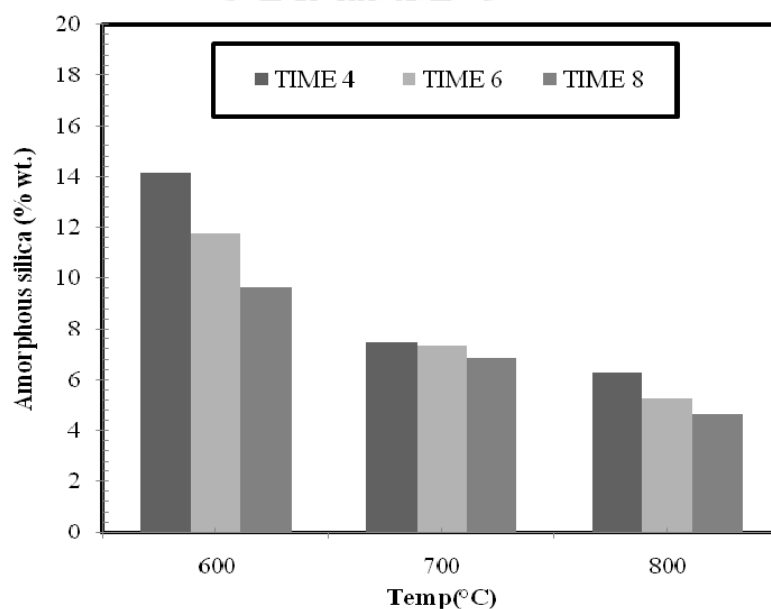
ผลการศึกษาระยะเวลาที่ใช้การเผาต่อปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานพบว่า เมื่อจำกัดระยะเวลาที่ใช้เผายู่ระหว่าง 4 6 และ 8 ชั่วโมง ระยะเวลาที่ใช้เผานานขึ้นมีผลทำให้ปริมาณซิลิกาอสัณฐานมีแนวโน้มลดต่ำลง และการลดต่ำลงของปริมาณร้อยละซิลิกาอสัณฐานจะไม่คงที่สม่ำเสมอตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอดังแสดงในรูปที่ 4.18 ถึง 4.20 มีลักษณะคล้ายผลของอุณหภูมิต่อปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน



รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบผลของระยะเวลาที่ใช้เผาไดอะดอมไมท์ต่อปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน



รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบผลของระยะเวลาที่ใช้เผาเพอร์ไลต์
ต่อปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน

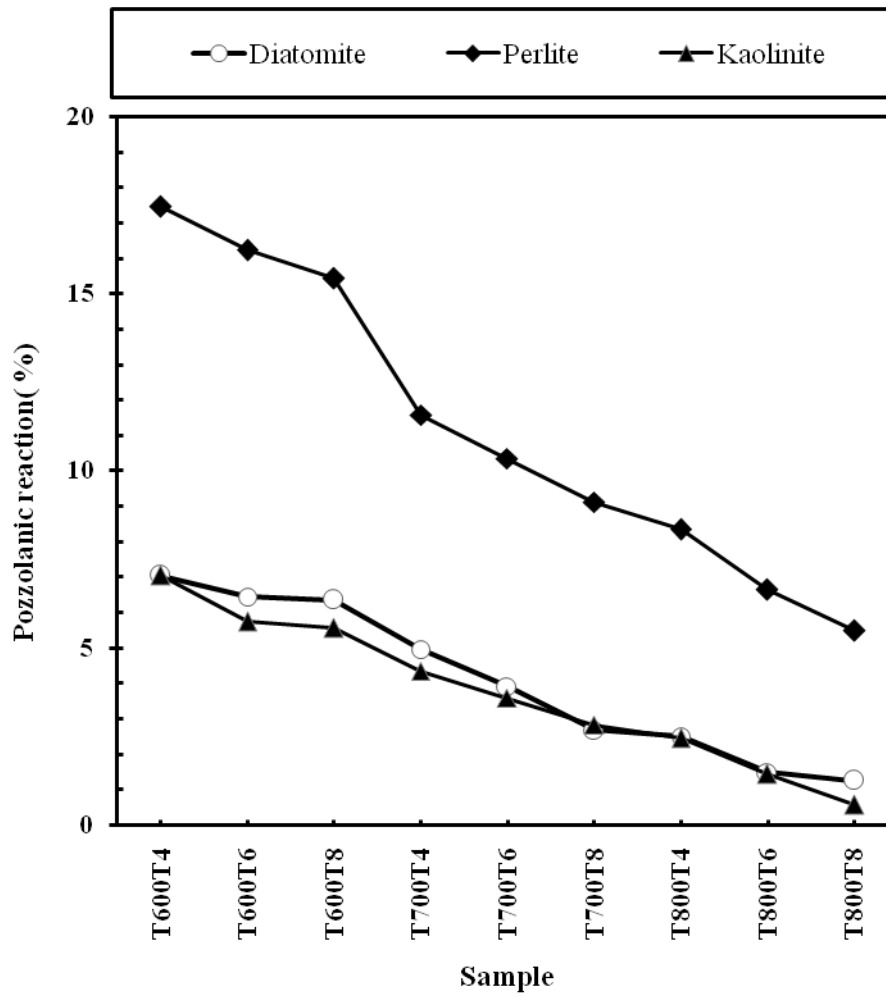


รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบผลของระยะเวลาที่ใช้เผาดินขาวปราจีน
ต่อปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน

จากรูป 4.18 ถึง 4.20 พบว่าระยะเวลาที่ใช้เผามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปของปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานในวัสดุทั้งสามชนิด แสดงให้เห็นว่าปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานที่เปลี่ยนแปลงไปไม่ขึ้นกับชนิดของวัสดุ แต่แปรผันกับระยะเวลาที่ใช้เผาจะอยู่ในลักษณะแปรผกผันกันระหว่างปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานกับระยะเวลาที่ใช้เผาเช่นเดียวกันกับผลของอุณหภูมิตามหัวข้อ 4.8

4.10 การเปรียบเทียบความเป็นปอซโซลานของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 °C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง

การเปรียบเทียบความเป็นปอซโซลานของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีน ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 °C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง จะใช้เกณฑ์วัดด้วยร้อยละการเกิดปฏิกิริยาที่ปอซโซลานดังแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าเพอร์ไลต์จะมีความเป็นปอซโซลานมากที่สุดอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานอยู่ที่ร้อยละ 17.45 ถึง 5.50 ในส่วนของไคอะตอมไมท์และดินขาวปราจีนจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานค่อนข้างใกล้เคียงกัน ไคอะตอมไมท์เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานอยู่ที่ร้อยละ 7.05 ถึง 1.27 และดินขาวปราจีนเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานอยู่ที่ร้อยละ 7.04 ถึง 0.57 แสดงให้เห็นว่าเพอร์ไลต์จะมีความเป็นปอซโซลานมากที่สุด และไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบความเป็นปอซโซลานของไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีน ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง

บทที่ 5

บทสรุป

การศึกษาผลกระทบของปริมาณซิลิกาอสัณฐานในไออะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาว ปร่าจิ้น ต่อกำลังอัดและการเกิดปฏิกิริยาในซีเมนต์เพสต์ผสม สามารถสรุปได้ 4 ลักษณะ ได้แก่ สมการมาตรฐานที่ใช้หาปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้เผาคือการเปลี่ยนแปลงปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาอสัณฐาน ผลของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาอสัณฐานต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และคุณสมบัติความเป็นปอซโซลาน ของอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปร่าจิ้น

5.1 สรุปผลงานวิจัย

5.1.1 สมการมาตรฐานที่ใช้หาปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน

สมการมาตรฐานที่ใช้ในการหาค่าปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน จะอยู่ในรูป $y = 0.051x^3 - 0.367x^2 + 2.832x$ ซึ่งสมการนี้ จะใช้ได้กรณีที่ภายใต้เงื่อนไขการผสมสารเคมีผสม 3 ชนิด ได้แก่ซิลิกาไดออกไซด์อสัณฐาน (Amorphous silica) ซิลิกาไดออกไซด์ผลึก (Silica crystals) และอลูมินาออกไซด์ (Aluminaoxide) โดยผสมซิลิกาไดออกไซด์อสัณฐานค่าความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 กับซิลิกาไดออกไซด์ผลึกความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 และอลูมินาออกไซด์ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ในอัตราส่วนส่วน AM : C : Al (Amorphous silica : Silica crystal : Alumina) ทำการควบคุมให้น้ำหนักของอลูมินาออกไซด์คั่งที่ 2 กรัม และแปรผันน้ำหนักของ AM:C ร้อยละโดยน้ำหนักดังนี้ 100 : 0 80 : 20 60 : 40 40 : 60 และ 20 : 80 และในทุกๆ ตัวอย่างที่ต้องทำการทดสอบต้องผสมอลูมินาออกไซด์น้ำหนัก 2 กรัม กับตัวอย่างทดสอบ 2 กรัม เท่านั้นแล้วจึงทำการทดสอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันต่อไป

5.1.2 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีนต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาออสติฐานโดยจำกัดการเผาโดยใช้อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C และระยะเวลาในการเผาที่ 4 6 และ 8 ชั่วโมง

อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้เผาจะแปรผกผันกับปริมาณร้อยละซิลิกาออสติฐาน แสดงให้เห็นว่าการเผาที่อุณหภูมิสูงและใช้ระยะเวลานานจะทำให้ได้ปริมาณซิลิกาออสติฐานต่ำลง โดยปริมาณร้อยละซิลิกาออสติฐานจะไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทดสอบดังนั้นวัสดุทั้งสามชนิดนี้จะมีแนวโน้มร้อยละซิลิกาออสติฐานในทิศทางเดียวกัน

- ไคอะตอมไมท์ผ่านการเผาที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่กำหนดจะมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาออสติฐานอยู่ระหว่าง 43.82 ถึง 14.52 ไคอะตอมไมท์ที่ถูกเผาด้วยอุณหภูมิ 600°C ใช้ระยะเวลาในการเผา 4 ชั่วโมงมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาออสติฐานมากที่สุด และไคอะตอมไมท์ที่ถูกเผาด้วยอุณหภูมิ 800°C ใช้ระยะเวลาในการเผา 8 ชั่วโมงมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาออสติฐานต่ำที่สุด

- เพอร์ไลต์ผ่านการเผาที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่กำหนดจะมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาออสติฐานอยู่ระหว่าง 57.47 ถึง 22.77 เพอร์ไลต์ที่ถูกเผาด้วยอุณหภูมิ 600°C ใช้ระยะเวลาในการเผา 4 ชั่วโมงมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาออสติฐานมากที่สุด และเพอร์ไลต์ที่ถูกเผาด้วยอุณหภูมิ 800°C ใช้ระยะเวลาในการเผา 8 ชั่วโมงมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาออสติฐานต่ำที่สุด

- ดินขาวปราจีนผ่านการเผาที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่กำหนดจะมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาออสติฐานอยู่ระหว่าง 14.18 ถึง 4.64 ดินขาวปราจีนที่ถูกเผาด้วยอุณหภูมิ 600°C ใช้ระยะเวลาในการเผา 4 ชั่วโมงมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาออสติฐานมากที่สุด และดินขาวปราจีนที่ถูกเผาด้วยอุณหภูมิ 800°C ใช้ระยะเวลาในการเผา 8 ชั่วโมงมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาออสติฐานต่ำที่สุด

5.1.3 ผลของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาออสติฐานต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน

ผลของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาออสติฐานจะแปรผันตรงกับความความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน กล่าวคือหากร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาออสติฐานซึ่งเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาปอซโซลานมีมากความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาก็จะมากขึ้นตามไปด้วยและคุณสมบัติเด่นอย่างหนึ่งของซิลิกาออสติฐานคือพื้นที่ผิวจำเพาะและความละเอียดสูงทำให้ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาเคมีนั้นเร็วและง่ายขึ้น

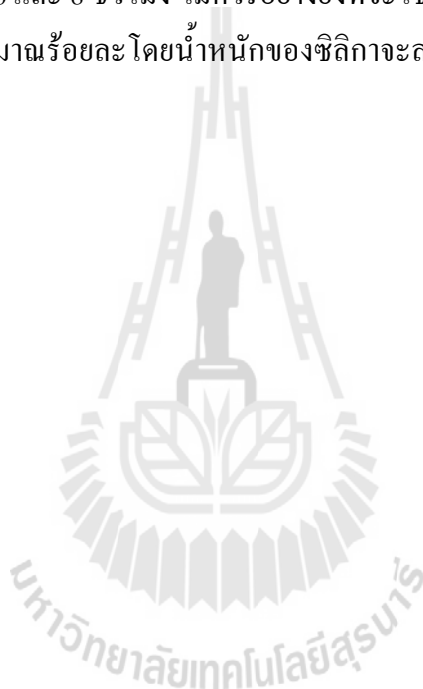
- ไคอะตอมไมท์ผ่านการเผาที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่กำหนดจะมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาอสัณฐานอยู่ระหว่าง 43.82 ถึง 14.52 ซึ่งมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาได้อยู่ระหว่าง 7.05 ถึง 1.27 เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน
- เพอร์ไลต์ผ่านการเผาที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่กำหนดจะมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาอสัณฐานอยู่ระหว่าง 57.47 ถึง 22.77 ซึ่งมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาได้อยู่ระหว่าง 17.45 ถึง 5.50 เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน
- ดินขาวปราจีนผ่านการเผาที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่กำหนดจะมีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักซิลิกาอสัณฐานอยู่ระหว่าง 14.18 ถึง 4.64 ซึ่งมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาได้อยู่ระหว่าง 7.04 ถึง 0.57 เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐาน

5.1.4 คุณสมบัติความเป็นปอซโซลาน ของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีน จำกัดการเผาโดยใช้อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C และระยะเวลาในการเผาที่ 4 6 และ 8 ชั่วโมง

ไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีนจำกัดการเผาโดยใช้อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C และใช้ระยะเวลาในการเผาที่ 4 6 และ 8 ชั่วโมง ในทุกส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติความเป็นปอซโซลาน ก็จะแสดงให้เห็นที่อายุทดสอบที่ 28 วันของทุกส่วนผสมจะมีกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมมากกว่าซีเมนต์ผสมทรายซึ่งเป็นตัวแทนของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยเพอร์ไลต์จะมีความเป็นปอซโซลานมากที่สุดต่อมาจะเป็นไคอะตอมไมท์และดินขาวปราจีน ตามลำดับ ซึ่งมีความเป็นปอซโซลานของไคอะตอมไมท์และ ดินขาวปราจีนไม่ต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจนนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาอสัณฐานในไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีน จะส่งผลโดยตรงต่อกำลังอัด ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานโดยตรงและกำลังอัดที่เกิดขึ้นจะต้องอาศัยระยะเวลาในการแสดงผล หากโครงสร้างใดต้องการกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาสั้นจึงไม่เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำวัสดุทั้งสามชนิดนี้ไปใช้งาน นอกจากนี้การปรับปรุงคุณภาพของวัสดุโดยการเผาให้ความร้อนจะเหมาะสมกับวัสดุบางชนิดเท่านั้นไม่สามารถใช้ได้กับวัสดุทุกชนิดในแง่ของปริมาณร้อยละของซิลิกาอสัณฐานที่จำกัดการเผาโดยใช้อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C และใช้ระยะเวลาในการเผาที่ 4 6 และ 8 ชั่วโมง ไม่ควรอย่างยิ่งที่จะใช้อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการเผานานเพราะมีผลต่อปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาจะลดต่ำลงผลที่ได้คือกำลังอัดจะต่ำลงไปด้วย



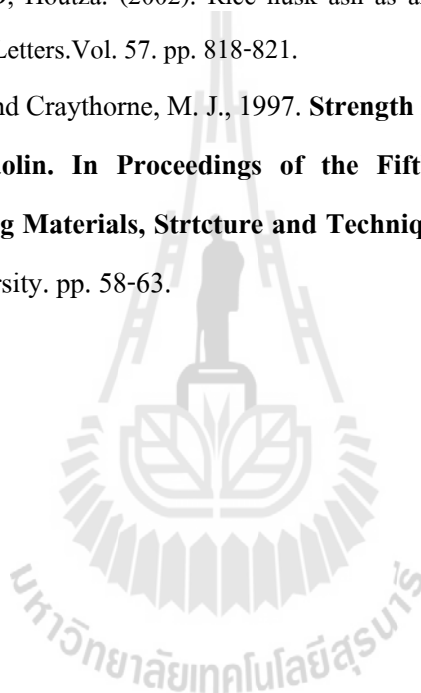
รายการอ้างอิง

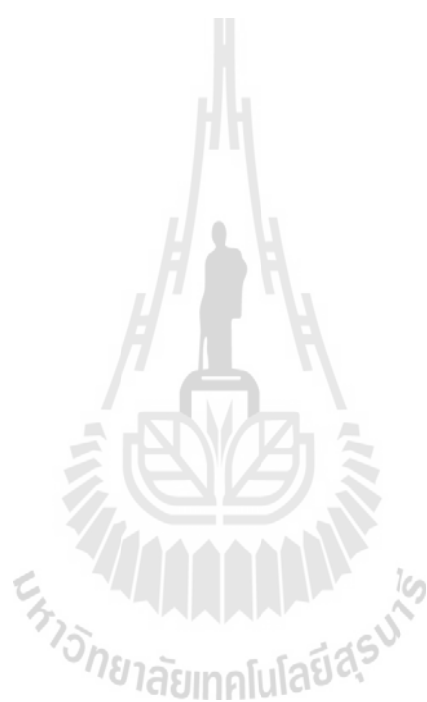
- กรมทรัพยากรธรณี. (2548). เพอร์ไลต์. [ออนไลน์]. ได้จาก: [http://www.dmr.go.th/Interest /Data /TI2dataD.htm](http://www.dmr.go.th/Interest/Data/TI2dataD.htm).
- คม บัวคลี่ และรังสรรค์ รังสิมาวงศ์. (2540). การพัฒนามอร์ต้าร์มวลเบาโดยใช้เพอร์ไลต์. เอกสารงานวิจัย. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- จิตรกร ตังอนุสรณ์สุข และคณะ. (2548). ผลกระทบของเพอร์ไลต์ต่อการซึมผ่านอากาศ และ ปริมาณช่องว่างอากาศภายในซีเมนต์มอร์ต้าร์. ปรินูญานิพนธ์. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ชัชวาล เศรษฐบุตร. (2540). คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 4. บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด. กรุงเทพฯ ฯ.
- ณรงค์ศักดิ์ นันทคำภิรา และคณะ. (2547). หินอัคนี[ออลไท์], [http:// www. soil. civil. mut. ac. th /rock/index1.html](http://www.soil.civil.mut.ac.th/rock/index1.html).
- นิคม จึงอยู่สุข และปัญญา สุริยะนาย. (2530). หินอุตสาหกรรมและการเกษตรแผนใหม่, ข่าวสาร การธรณี 46 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ประพัทธ์ กรังพานิชย์. (2540). การนำกากแร่สังกะสีและวัสดุพูนเบาเพอร์ไลต์มาผลิตเป็นคอนกรีต มวลเบา. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด. (2548). ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ. ปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย.
- มงคล จิรวัชรเดช. (2548). 430311 เทคโนโลยีคอนกรีต. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี.
- วินิต ช่อวิเชียร. (2544). คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ.
- สุธรรม ศรีหล่มศักดิ์ และคณะ. (2543). ปริมาณวิเคราะห์โดยเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน,วารสาร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

- สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน กลุ่มวิศวกรรมและความปลอดภัย. (2546). **เพอร์ไลท์**. [ออนไลน์].
 ได้จาก: <http://www.dpim.go.th/ppr/title.php?tid=000001074149948>.
- ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี. (2546). **การศึกษาเปรียบเทียบใช้โดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ในคอนกรีตมวลเบา**, วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สิทธิชัย แสงอาทิตย์. (2543). **เอกสารประกอบการสอนวิชา 410 214 Material Testing**. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อนุพงษ์ สุวรรณ. (2543). **การใช้ดินขาวเพื่อเพิ่มความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้า**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- อานนท์ ป้อมประสิทธิ์. (2545). **กรมวิทยาศาสตร์บริการ ศูนย์ความรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**.
ปอซโซลาน. [ออนไลน์]. ได้จาก: http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_11_2545_pozzalan.pdf.
- American Concrete Institute. (2000). **Use of Fly Ash in Concrete**. ACI Manual of Concrete Practice. Part 1. Michigan. (ACI 232.2 R-96).
- American Society for Testing and Materials. (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. (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 Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.01. (ASTM C 204).
- Allagu Balaguru and Robert Hall.(2009). **Tectonic Evolution and Sedimentation of Sabah, North Borneo, Malaysia**. Search and Discovery Article.
- Aydin, A.C. and Gul, R. (2007). **Influence of Volcanic Originated Natural Materials as Additives on The Setting Time and Some Mechanical Properties of Concrete**. Construction and Building Materials. 21, pp.1277-1281.

- Balaguru, P., 2001. **Properties of Normal and High-strength Concrete Containing Metakaolin.**In V.M.Malthotra ed. Fly Ash, Silica Fume, Slag & natural Pozzolans in Concrete. proceeding seventh CANMET/ACI International Conference. Bangkok. pp.737- 756.
- 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. pp.1627-1632.
- Fragoulisa, D., Stamatakisb, M.G., Chaniotakis E. and Columbusb, G. (2004). **Characterization of Light weight Aggregates Produced with Diatomite Rocks Originating From Greece.** Materials Characterization. 53. pp.307-316.
- Hensadeekul, T. (1995). **Use of Metakaolin From Lampang Province as a Pozzolana.** M. Eng. Thesis, Asia Inst. Technol.
- EI-Didamony. H., Khalil, K.A. and El-Attar, M.S. (2000). **Physicochemical characteristics of fired clay-limestone mixes.** Cement and Concrete Research. 30. pp.7-11.
- McCaffrey, R. (2002). **Global Cement and Lome Magazine.** Environmental Special Issue. pp.15-19.
- M.F. Souza., P.S. Batista., I. Regiani., J.B. Liborio and D.P. Souza.(2000). Rice husk Derived silica : Application in Portland cement and mullite whiskers. Materials Research. Vol. 3. pp. 25-30.
- Kedsarin Pimraksa and Prinya Chindaprasirt. (2008). **Lightweight Bricks Made of Diatomaceous Earth, Lime and Gypsum.** Ceramics International. CERI-2954. pp 8.
- Kostuch, J.A., Walters, V., and Jones, T.R. (2000). **High Performance Concretes Incorporating Metakaolin : A Review.** Concrete Economic and Durable Concrete through. pp.1799-1811.
- Murat, M., and Comal, C.,(1983). **Influence of Calcination Process of Kaolinite on Mechanical Strength of hardened Metakaolinite.** Cem. Concr. Vol.13(5).pp631-637.
- Neville, A. M., 1996. **Properties of Concrete. 4 nd ed.** Addison Wesley Longman Ltd. England.
- Oriol, M., and Pera, J., 1995. **Pozzolanic activity of metakaolin under microwave treatment.** Cem. Concr. Res. Vol.25(2).pp 265-270.

- Pekmezci, B.Y. and Akyu"z, S. (2004). **Optimum Usage of A Natural Pozzolan for The Maximum Compressive Strength of Concrete.** Cement and Concrete Research. Vol.34. pp.2175-2179.
- Proctor, A. (2000). **X-ray diffraction and scanning electron microscope studies of processed rice hull silica.** Journal of the American oil chemists society. Vol.67. pp.576-584.
- Salvador, S., (1995). **Pozzolanic Properties of Flash-Calcined Kaolinite .** A Comparative Study with Soak-Calcined Products. Cem.Concr. Vol.25. pp.102-112.
- V.P. Della, I. Kuhn and D. Houtza. (2002). Rice husk ash as an alternate source for Active silica production, Materials Letters.Vol. 57. pp. 818-821.
- Wild, S., Khatib, J. M., and Craythorne, M. J., 1997. **Strength Development of mortar contain metakaolin. In Proceedings of the Fifth International Conference on Modern Building Materials, Structure and Techniques.** Lithuania: Vilnius Gediminas Technical University. pp. 58-63.







ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบ X-Ray Diffraction Analysis ของกราฟมาตรฐาน
และไดอะแกรมไมท์ เพอร์ไลต์ ดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผา

ตารางที่ ก.1 แสดงผลการทดสอบ intensity ของซิลิกาอสัณฐาน

อัตราส่วน (AM:C) (%)	Intensity amorphous silica			AVG.
	NO.1	NO.2	NO.3	
100:0	184.25	184.38	194.61	184.41
80:20	174.09	173.02	171.33	173.14
60:40	153.47	153.32	153.56	153.45
40:60	132.43	132.07	131.89	132.13
20:80	98.18	97.65	95.44	97.09
0:100	0	0	0	0

ตารางที่ ก. 2 แสดงผลการทดสอบอัตราส่วน intensity ของซิลิกาอสัณฐานต่ออลูมินาออกไซด์

อัตราส่วน (AM:C) (%)	Intensity amorphous silica	Intensity amorphous silica per Intensity Aluminaoxide
100:0	184.41	13.58
80:20	173.14	12.75
60:40	153.45	11.30
40:60	132.13	9.73
20:80	97.09	7.15
0:100	0	0

ตารางที่ ก.3 แสดงผลการทดสอบ intensity ของซิลิกาอสัณฐานในโคอะคอมไมท์ เพอร์ไลต์ และดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C ระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง

Type	Intensity amorphous silica			AVG.
	NO.1	NO.2	NO.3	
DT600T4	137.53	137.29	137.05	137.29
DT600T6	121.88	122.15	122.21	122.08
DT600T8	108.53	108.79	108.99	108.91
DT700T4	102.84	102.21	102.12	102.39
DT700T6	97.16	97.33	97.20	97.23
DT700T8	93.15	93.17	93.16	93.16
DT800T4	85.88	85.90	85.71	85.83
DT800T6	83.89	83.66	8.45	83.79
DT800T8	80.47	80.59	80.53	80.53
PT600T4	152.27	152.19	152.23	152.23
PT600T6	150.06	149.89	149.81	149.92
PT600T8	147.85	147.92	147.90	147.89
PT700T4	146.08	146.15	146.13	146.12
PT700T6	139.59	139.40	139.42	139.47
PT700T8	139.11	139.15	138.92	139.06
PT800T4	137.43	147.42	137.42	137.43
PT800T6	106.09	106.07	106.02	106.06
PT800T8	103.38	103.33	103.31	103.34
KT600T4	79.30	79.30	79.32	79.31
KT600T6	69.88	69.76	69.76	69.80
KT600T8	59.43	59.43	59.43	59.43
KT700T4	46.55	46.59	46.60	46.58
KT700T6	45.88	45.87	45.88	45.86
KT700T8	42.69	42.63	42.60	42.64

ตารางที่ ก.3 แสดงผลการทดสอบ intensity ของซิลิกาอสัณฐานในไดอะทอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาว ปราจีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง (ต่อ)

Type	Intensity amorphous silica			AVG.
	NO.1	NO.2	NO.3	
KT800T4	38.84	38.84	38.84	38.84
KT800T6	31.93	31.90	31.90	31.91
KT800T8	27.43	27.43	27.43	27.43



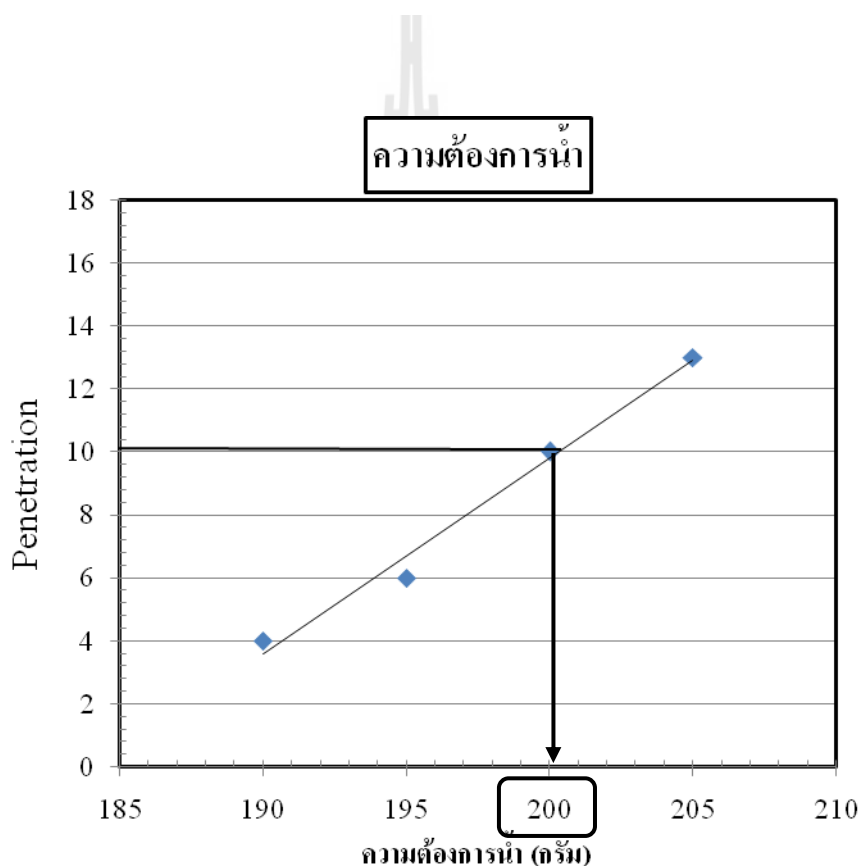


ภาคผนวก ข

คุณสมบัติพื้นฐานและกำลังอัดของไดอะทอมไมท์ เพอร์ไลท์
และดินขาวปราจีน

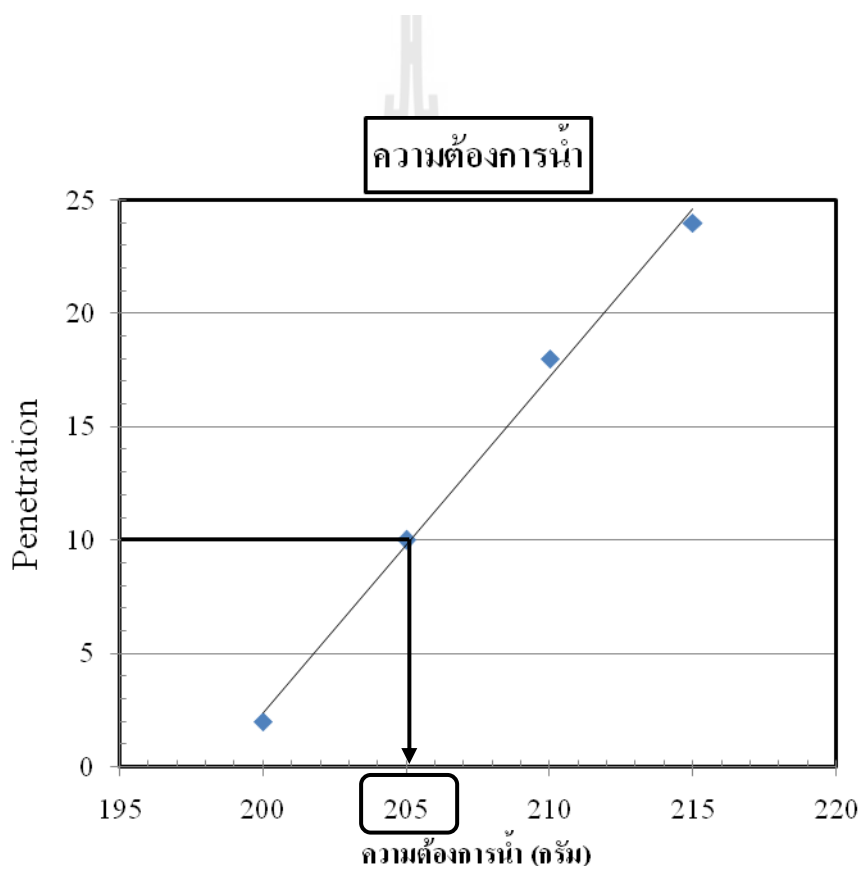
ตารางที่ ข.1 แสดงผลการทดสอบความชื้นเหลวปกติของไคอะตอมไมท์

การทดลองที่	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม)	%	ปริมาณน้ำ (กรัม)	ค่า Penetration ใน ระยะเวลา 30 วินาที
1	500	38	190	4
2	500	39	195	6
3	500	40	200	10
4	500	41	205	13



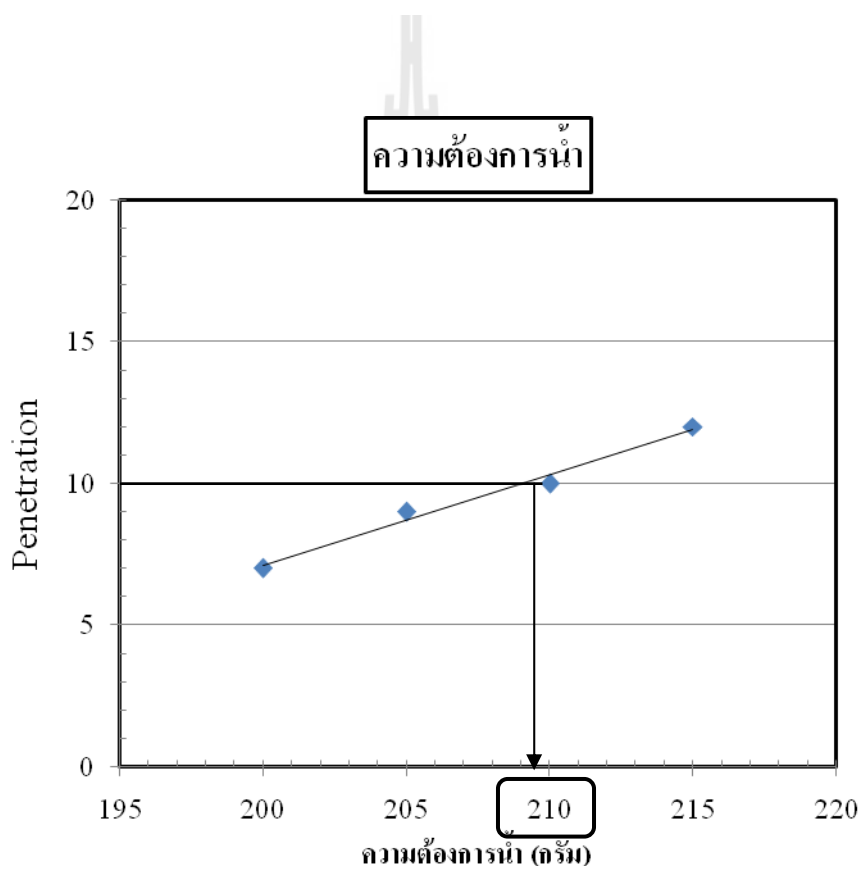
ตารางที่ ข2. แสดงผลการทดสอบความชื้นเหลวปกติของเพอร์ไลต์

การทดลองที่	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม)	%	ปริมาณน้ำ (กรัม)	ค่า Penetration ใน ระยะเวลา 30 วินาที
1	500	40	200	2
2	500	41	205	10
3	500	42	210	18
4	500	43	215	24



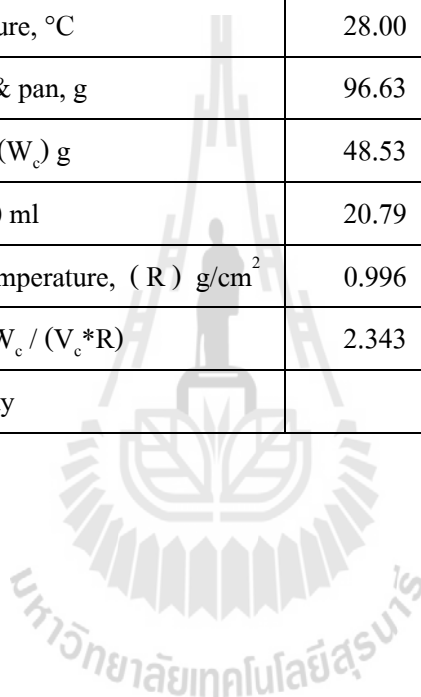
ตารางที่ ข3. แสดงผลการทดสอบค่าความชื้นเหลือปกติของเพอร์ไลต์

การทดลองที่	น้ำหนักของซีเมนต์ (กรัม)	%	ปริมาณน้ำ (กรัม)	ค่า Penetration ใน ระยะเวลา 30 วินาที
1	500	40	200	7
2	500	41	205	9
3	500	42	210	10
4	500	43	215	12



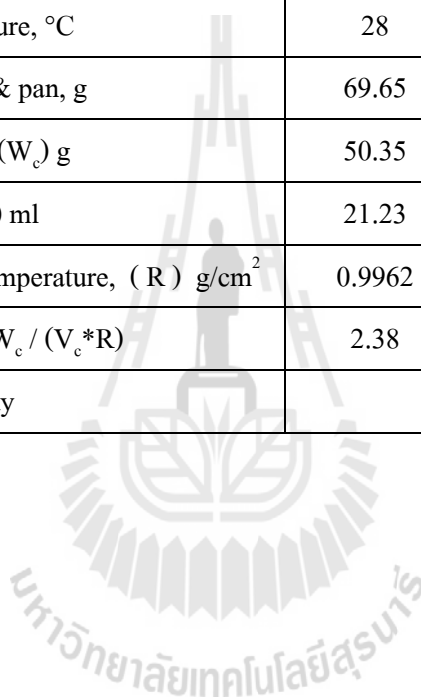
ตารางที่ ข4. แสดงผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของไดอะตอมไมท์

Description	Result		
	Test No1.	Test No2.	Test No3.
Initial Flask reading, ml	0.9	0.8	0.9
Initial kerosene temperature, °C	28.00	28.00	28.00
Initial weight of sample & pan, g	145.16	146.82	146.39
Final flask reading, ml	21.69	21.54	21.46
Final kerosene temperature, °C	28.00	28.00	28.00
Final weight of sample & pan, g	96.63	98.10	98.27
Weight of sample used, (W_c) g	48.53	48.72	48.12
Volume displaced, (V_c) ml	20.79	20.74	20.56
Density of water at temperature, (R) g/cm ²	0.996	0.996	0.996
Specific gravity, $S_G = W_c / (V_c * R)$	2.343	2.358	2.349
Average specific gravity	2.35		



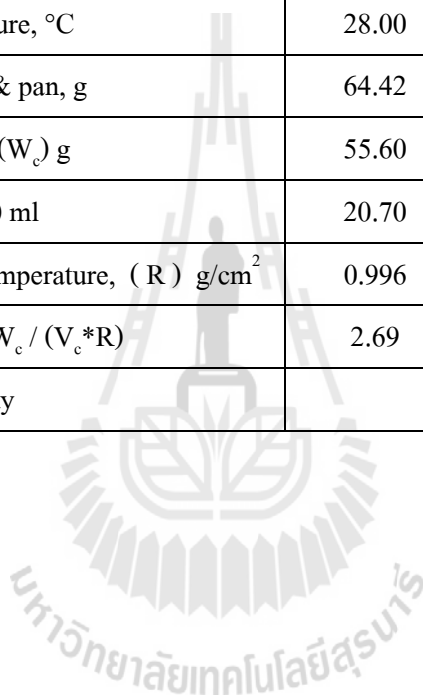
ตารางที่ ข5. แสดงผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของเพอร์ไลต์

Description	Result		
	Test No1.	Test No2.	Test No3.
Initial Flask reading, ml	0.8	0.70	0.90
Initial kerosene temperature, °C	28	28	28
Initial weight of sample & pan, g	120	120	120
Final flask reading, ml	21.5	21.8	21.6
Final kerosene temperature, °C	28	28	28
Final weight of sample & pan, g	69.65	69.74	69.88
Weight of sample used, (W_c) g	50.35	50.26	50.12
Volume displaced, (V_c) ml	21.23	21.10	21.70
Density of water at temperature, (R) g/cm ²	0.9962	0.9962	0.9962
Specific gravity, $S_G = W_c / (V_c * R)$	2.38	2.39	2.43
Average specific gravity	2.40		



ตารางที่ ข6. แสดงผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของดินขาวปราจีน

Description	Result		
	Test No1.	Test No2.	Test No3.
Initial Flask reading, ml	0.6	0	0.5
Initial kerosene temperature, °C	20.50	20.50	20.50
Initial weight of sample & pan, g	120.02	120.02	120.02
Final flask reading, ml	21.30	21.00	20.73
Final kerosene temperature, °C	28.00	28.00	28.00
Final weight of sample & pan, g	64.42	64.71	65.47
Weight of sample used, (W_c) g	55.60	55.31	54.55
Volume displaced, (V_c) ml	20.70	21.00	21.23
Density of water at temperature, (R) g/cm ²	0.996	0.996	0.996
Specific gravity, $S_G = W_c / (V_c * R)$	2.69	2.74	2.58
Average specific gravity	2.67		

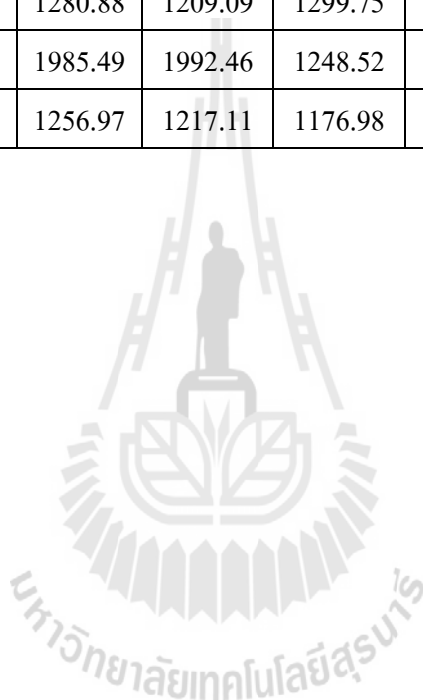


ตารางที่ ข7. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์เพสต์ผสม
ไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ
800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง ที่อายุทดสอบ 3 วัน

ชนิด	กำลังอัด (kg/cm ²)						
	1	2	3	4	5	6	เฉลี่ย
OPC	487.52	490.72	519.04	459.50	437.27	538.15	488.70
SAND	495.24	528.65	419.83	427.19	436.98	547.21	475.85
DT600T4	402.18	421.63	400.46	459.68	478.53	369.04	421.92
DT600T6	386.19	397.49	478.62	448.61	357.82	337.03	400.96
DT600T8	358.58	418.63	387.65	396.87	384.28	404.25	391.71
DT700T4	310.56	453.29	342.78	378.65	399.63	388.97	378.98
DT700T6	401.82	437.21	324.74	348.96	385.63	359.14	376.25
DT700T8	386.95	375.96	397.21	410.62	352.98	318.3	373.67
DT800T4	281.76	348.51	387.93	358.72	276.91	381.97	339.30
DT800T6	290.58	367.92	317.64	390.75	286.38	358.47	335.29
DT800T8	389.31	342.81	317.93	250.65	275.96	358.52	322.53
PT600T4	472.64	504.73	419.74	386.26	489.51	474.88	457.96
PT600T6	385.09	394.26	429.57	417.26	408.64	394.22	404.84
PT600T8	357.81	389.04	376.09	418.53	432.56	402.69	396.12
PT700T4	416.83	458.61	354.76	348.75	317.59	472.02	394.76
PT700T6	316.08	357.84	427.84	452.87	489.63	252.48	382.79
PT700T8	329.65	358.01	391.76	427.93	418.67	357.82	380.64
PT800T4	326.75	357.52	381.63	318.41	396.34	485.91	377.76
PT800T6	319.76	368.65	398.61	332.87	359.73	477.82	376.24
PT800T8	321.96	369.71	285.91	379.64	405.87	359.47	353.76
KT600T4	387.90	398.76	428.96	459.62	396.32	411.84	413.90
KT600T6	348.95	381.05	395.76	453.18	421.76	345.42	391.02
KT600T8	431.98	419.76	358.15	328.95	300.58	469.62	384.84
KT700T4	328.41	389.52	358.03	376.93	318.65	441.14	368.78

ตารางที่ ข7. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์เพสต์ผสม
ไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีน ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ
800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง ที่อายุทดสอบ 3 วัน (ต่อ)

ชนิด	กำลังอัด (kg/cm ²)						
	1	2	3	4	5	6	เฉลี่ย
KT700T6	1314.28	1300.80	1245.73	1238.69	1211.75	1252.83	1260.68
KT700T8	1298.99	1276.23	1287.65	1996.48	1999.48	1574.18	1256.93
KT800T4	1238.75	1280.88	1209.09	1299.75	1303.57	1142.40	1245.74
KT800T6	1314.28	1985.49	1992.46	1248.52	1978.69	1079.50	1239.99
KT800T8	1276.94	1256.97	1217.11	1176.98	1138.96	1341.78	1234.79



ตารางที่ ข8. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์เพสต์ผสม
ไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ
800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง ที่อายุทดสอบ 28 วัน

ชนิด	กำลังอัด (kg/cm ²)						
	1	2	3	4	5	6	เฉลี่ย
OPC	827.58	845.32	819.39	783.12	796.48	851.23	820.52
SAND	754.72	700.85	659.86	789.40	752.41	661.14	719.73
DT600T4	800.45	748.95	719.47	765.49	773.59	815.05	770.50
DT600T6	763.32	769.85	775.10	759.71	778.92	750.30	766.20
DT600T8	769.38	769.58	789.47	791.49	710.73	762.53	765.53
DT700T4	759.30	681.29	749.34	789.62	792.14	761.25	755.49
DT700T6	768.78	751.28	722.60	738.65	741.17	765.10	747.93
DT700T8	721.00	719.98	778.68	795.43	728.46	691.47	739.17
DT800T4	798.63	712.06	701.63	726.93	754.23	733.38	737.81
DT800T6	768.29	748.42	719.06	702.54	725.10	719.71	730.52
DT800T8	701.62	716.98	759.99	744.20	722.60	727.77	728.86
PT600T4	881.85	841.86	792.01	832.67	853.61	869.92	845.32
PT600T6	830.00	871.45	782.61	889.09	845.01	800.48	836.44
PT600T8	830.97	821.22	848.61	835.69	825.46	822.73	830.78

ตารางที่ ข8. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์เพสต์ผสม ใ
 อะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600, 700 และ
 800°C เป็นระยะเวลา 4, 6 และ 8 ชั่วโมง ที่อายุทดสอบ 28 วัน (ต่อ)

ชนิด	กำลังอัด (kg/cm ²)						
	1	2	3	4	5	6	เฉลี่ย
PT700T4	800.00	842.81	786.68	796.98	814.61	777.64	803.12
PT700T6	785.63	799.99	809.27	768.93	799.06	802.74	794.27
PT700T8	788.89	779.03	795.76	790.55	785.02	773.27	785.42
PT800T4	765.25	785.78	766.18	806.97	743.76	811.22	779.86
PT800T6	768.95	790.05	765.09	794.12	732.99	754.10	767.55
PT800T8	760.09	798.23	736.85	712.70	732.22	815.59	759.28
KT600T4	786.89	712.36	806.14	817.63	724.71	774.55	770.38
KT600T6	774.18	712.95	745.83	781.45	766.84	785.29	761.09
KT600T8	742.39	785.74	760.71	711.32	795.23	763.65	759.84
KT700T4	792.40	763.41	732.59	719.03	745.29	754.00	751.12
KT700T6	749.83	756.02	710.17	732.85	728.85	796.24	745.66
KT700T8	740.99	781.29	751.34	714.95	709.67	742.90	740.19
KT800T4	729.12	735.91	794.22	710.52	787.59	667.34	737.45
KT800T6	748.05	728.46	732.56	768.99	713.58	689.26	730.15
KT800T8	726.98	719.85	691.08	718.57	779.56	707.12	723.86

ตารางที่ ข9. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์เพสต์ผสม
ไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600, 700 และ
800°C เป็นระยะเวลา 4, 6 และ 8 ชั่วโมง ที่อายุทดสอบ 60 วัน

ชนิด	กำลังอัด (kg/cm ²)						
	1	2	3	4	5	6	เฉลี่ย
OPC	1235.49	1248.31	1233.42	1225.11	1220.39	1213.02	1229.29
SAND	1099.38	1152.54	1083.22	1079.96	1074.37	1091.81	1096.88
DT600T4	1299.38	1345.85	1311.94	1320.84	1321.12	1306.05	1317.53
DT600T6	1340.73	1359.66	1495.64	1437.85	1429.41	1270.89	1389.03
DT600T8	1393.48	1520.48	1159.47	1033.56	1358.73	1746.12	1368.64
DT700T4	1300.01	1348.59	1361.32	1382.98	1348.55	1375.11	1352.76
DT700T6	1365.77	1386.59	1312.62	1310.00	1344.52	1377.68	1349.53
DT700T8	1365.98	1365.83	1367.98	1327.98	1340.40	1235.29	1333.91
DT800T4	1212.45	1298.76	1277.54	1297.60	1289.73	1158.18	1255.71
DT800T6	1267.09	1274.92	1287.68	1265.91	1282.61	1121.07	1249.88
DT800T8	1286.87	1210.96	1211.33	1238.95	1240.07	1259.74	1241.32
PT600T4	1678.94	1634.42	1765.98	1950.62	1303.96	1350.56	1614.08
PT600T6	1598.58	1543.56	1789.45	1640.78	1512.74	1542.97	1604.68
PT600T8	1432.98	1564.23	1608.94	1619.56	1600.08	1742.05	1594.64
PT700T4	1534.90	1432.87	1688.56	1563.96	1580.42	1666.33	1577.84
PT700T6	1708.45	1699.21	1302.38	1298.48	1199.99	2133.73	1557.04
PT700T8	1698.46	1627.06	1436.07	1367.94	1379.58	1752.49	1543.60
PT800T4	1297.97	1325.96	1563.07	1472.85	1694.64	1483.99	1473.08
PT800T6	1470.48	1495.07	1425.95	1509.58	1538.06	1352.54	1465.28
PT800T8	1573.57	1412.75	1410.00	1444.96	1399.57	1538.35	1463.20
KT600T4	1305.99	1398.64	1285.76	1247.35	1278.07	1300.57	1302.73
KT600T6	1351.85	1389.40	1231.11	1265.69	1254.08	1277.63	1294.96
KT600T8	1348.73	1256.85	1231.24	1253.95	1259.67	1387.22	1289.61
KT700T4	1296.39	1401.57	1150.38	1143.43	1328.65	1326.88	1274.55

ตารางที่ ข9. แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ความคุมและซีเมนต์เพสต์ผสม
 ไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ และดินขาวปราจีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 700
 และ 800°C เป็นระยะเวลา 4 6 และ 8 ชั่วโมง ที่อายุทดสอบ 60 วัน (ต่อ)

ชนิด	กำลังอัด (kg/cm ²)						
	1	2	3	4	5	6	เฉลี่ย
KT700T6	1395.37	1227.95	1211.95	1190.75	1143.70	1394.36	1260.68
KT700T8	1295.77	1234.80	1296.58	1200.87	1245.89	1267.67	1256.93
KT800T4	1294.67	1265.40	1218.99	1215.38	1275.91	1204.09	1245.74
KT800T6	1263.88	1212.97	1210.53	1206.95	1298.67	1246.94	1239.99
KT800T8	1275.64	1200.98	1968.35	1286.31	1255.05	422.41	1234.79







ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลกระทบของปริมาณความไม่เป็นผลึกของธาตุซิลิกาในไคอะตอมไมท์
ต่อกำลังอัดและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในซีเมนต์ผสม

INFLUENCE OF AMORPHOUS SILICA IN DIATOMITE ON COMPRESSIVE STRENGTH
AND POZZOLANIC REACTION BLENDED CEMENT PASTE

ปิยะฉัตร สุภวิทยาเจริญกุล(Piyachat Suphawithayacharoenkul)¹

วันโชค เครือหงษ์ (Wunchock Krochong)²

ธีรวัฒน์ สินศิริ(Threerawat Sinsiri)³

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

(Piyachat_ann@hotmail.com)

²นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Wunchock_k@hotmail.com

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี(sinsiri@g.sut.ac.th)

บทคัดย่อ : การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาปริมาณความไม่เป็นผลึกของธาตุซิลิกา ในไคอะตอมไมท์ ซึ่งมีผลต่อกำลังอัดและความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์สารประกอบด้วยรังสีเอ็กซ์เรย์ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำเอาไคอะตอมไมท์ มาผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส ที่เวลาการเผา 4, 6 และ 8 ชั่วโมง บดไคอะตอมไมท์และทรายให้ขนาดอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบสารประกอบด้วยรังสีเอ็กซ์เรย์ พบว่าไคอะตอมไมท์ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการเผา 4 ชั่วโมง มีปริมาณความไม่เป็นผลึกของธาตุซิลิกาสูงที่สุด และจากการทดสอบกำลังอัดและความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ในคอนกรีตพบว่าปริมาณความไม่เป็นผลึกของซิลิกามีผลต่อการเพิ่มขึ้นของการรับกำลังอัดและความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีต

ABSTRACT : This research was to determine of amorphous silica in diatomite. That affect to compressive strength and degree of pozzolanic reaction. By using X-ray diffraction method. In this study, Diatomite was burnt in difference temperature 600°c, 700° c, and 800° c and difference time 4, 6 and 8 hr. The diatomite to ground and sand were as same size cement. Portland cement type I was replaced by diatomite or ground sand at 20% by weight of cementitious material. The water to binder ratio (w/c) of 0.40 was used for all the blended cement past mixer. Result of X-ray diffraction show that the diatomite to fire 600 at 4 hr. had the most amorphouse silica. The result show the amorphouse silica content effect on compressive strength and degree of pozzolanic reaction.

KEYWORDS : Diatomite, Quantitative Analysis by X-ray diffraction, Amorphous

1. บทนำ

ปัจจุบันคอนกรีตเป็นวัสดุหลักที่นิยมนำมาใช้ในงานก่อสร้างอย่างแพร่หลาย โดยวัสดุยึดประสานที่ใช้มากที่สุดเป็นอันดับหนึ่งในการผลิตคอนกรีต คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงและพลังงานสูงมาก และยังคงก่อให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเป็นก๊าซที่มีส่วนสำคัญก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming) การผลิตปูนซีเมนต์ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซที่มีผลต่อการเกิดภาวะเรือนกระจกถึงปีละ 13,500 ล้านตัน หรือประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซที่ปล่อยออกมาในบรรยากาศทั้งหมด [1,2] จากผลกระทบดังกล่าวจึงมีแนวคิดที่จะลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ โดยการหาวัสดุชนิดอื่นมาผสมกับปูนซีเมนต์ เพื่อผลิตปูนซีเมนต์ผสม (Blend Cement) วัสดุดังกล่าว ได้แก่ วัสดุพอซโซลาน (Pozzolan Materials)

วัสดุพอซโซลานได้เข้ามามีบทบาทในงานคอนกรีตโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลงเพื่อลดการทำลายสิ่งแวดล้อมและเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น ตามมาตรฐาน ASTM วัสดุพอซโซลานคือวัสดุที่มีซิลิกาเพียงอย่างเดียวหรือมีทั้งซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนวัสดุพอซโซลานธรรมชาติก็คือวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักที่อยู่ตามธรรมชาติ ได้แก่ ไดอะคอมไมท์ เพอร์ไลท์ ดินขาว และซีโอไลท์โดยปกติแล้ววัสดุพอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน แต่ถ้าขนาดเม็ดมีความละเอียดและความชื้นที่เพียงพอก็จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานเช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่อัตราการเกิดจะช้ากว่าเรียกว่าปฏิกิริยาพอซโซลาน [3]

แร่ดินเบาหรือไดอะคอมไมท์ (diatomite) เป็นหินตะกอนชนิดหนึ่งเกิดจากการทับถมของสาหร่ายเซลล์เดียวเป็นเวลานานจนกลายเป็นหิน แร่ดินเบาในประเทศไทยมี

มากที่จังหวัดลำปาง โดยมีปริมาณมากกว่า 100 ล้านตัน แร่ดินเบาที่มีคุณสมบัติเชิงโครงสร้างที่เบาหวกนำมาบดให้ละเอียดจะคล้ายดินเหนียว ผลึกของแร่ดินเบาที่มีประจุลบตกค้างอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการแตกหักของขอบผลึกทำให้กลุ่มไฮดรอกซิลที่จับอยู่กับอนุมูลเนียมหรือซิลิกอนแตกตัวออกมา ทำให้เกิดความไม่สมดุลทางประจุไฟฟ้าขึ้น ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวของผลึกนี้จะสามารถดึงดูดประจุบวกไว้ในสัดส่วนที่เท่ากันกับประจุลบที่มีอยู่ในลักษณะหลวม ๆ ซึ่งสามารถถูกไล่แทนที่โดยประจุบวกชนิดอื่น ๆ ได้ การไล่ที่กันของประจุบวกที่ผิวดินเหนียวในลักษณะนี้อาจเรียกว่าการแลกเปลี่ยนประจุบวก [4,5]

วัสดุพอซโซลานที่อยู่ในรูปความไม่เป็นผลึกของซิลิกานั้น วัสดุนั้นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิ และเวลาที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส ในรูปของผลึกให้เปลี่ยนเป็นเฟสไม่เป็นผลึก โดยที่อุณหภูมิและเวลาที่ใช้เผาที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อปริมาณความไม่เป็นผลึกของซิลิกาและความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้ของวัสดุพอซโซลานด้วย ดังนั้นจึงถือได้ว่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนเฟสของวัสดุพอซโซลานจึงมีความสำคัญอีกประการหนึ่งในการพัฒนาวัสดุพอซโซลานให้มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น

2. วัตถุประสงค์

เพื่อเปรียบเทียบหาปริมาณ ความไม่เป็นผลึกของซิลิกา ในการเผาไดอะคอมไมท์ ที่เกิดขึ้นภายใต้การเผาไดอะคอมไมท์ที่อุณหภูมิ 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส ที่เวลาการเผา 4, 6 และ 8 ชั่วโมง วิเคราะห์ผล ความไม่เป็นผลึกโดยใช้วิธีเทคนิคการวิเคราะห์สารประกอบด้วยรังสีเอ็กซ์เรย์ เปรียบเทียบความสอดคล้องกับกำลังอัดและปฏิกิริยาพอซโซลานที่เกิดขึ้น

3. วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

- 1.) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 2.) โดอะคอมไมท์

3.2 การเตรียมวัสดุ

เผาโดอะคอมไมท์ที่อุณหภูมิ 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียสเผาเป็นเวลา 4, 6 และ 8 ชั่วโมง นำมาร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ASTM เบอร์ 200 ทำการบดทรายและโดอะคอมไมท์ ด้วยเครื่องบดให้มีขนาดอนุภาคให้ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ ตรวจสอบขนาดอนุภาคโดยเครื่องตรวจสอบขนาดอนุภาค

3.3 อัตราส่วนผสม

หล่อก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 และโดอะคอมไมท์หรือทรายทดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักวัสดุโดยทำการหล่อตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C109 ขนาด 50X50X5 มม. ถอดแบบแล้วนำตัวอย่างไปบ่มด้วยน้ำ ทดสอบกำลังอัดที่ 3, 14 และ 28 วัน

3.4 การหาปริมาณวิเคราะห์ความไม่เป็นผลึกของซิลิกาโดย

วิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน โดยใช้สารมาตรฐานภายนอก

ปริมาณวิเคราะห์โดยใช้สารมาตรฐานภายนอกเป็นวิธีวิเคราะห์โดยผสมชุดผสมระหว่างซิลิกาที่มีเฟสความไม่เป็นผลึก (Amorphous silica) มีค่าความบริสุทธิ์ 100% และซิลิกาที่มีเฟสผลึก (Silica crytralyne) 100% ในอัตราส่วน A:C (Amorphous silica: Silica crytralyne) ดังต่อไปนี้ 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 และ 0:100 โดยน้ำหนัก แล้วนำมาวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันสร้างความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ไดกราฟของซิลิกาที่มีเฟสความไม่เป็นผลึกหารด้วยพื้นที่ไดกราฟของซิลิกาที่มีเฟสความไม่เป็นผลึก ร้อยละ 100 ความสัมพันธ์ที่ได้จะเป็นกราฟมาตรฐานเพื่อนำมาเทียบหาร้อยละโดยน้ำหนักของความไม่เป็นผลึกของซิลิกาในโดอะคอมไมท์ตัวอย่างอื่นๆ ต่อไป [7]

3.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

Am:C คือ อัตราส่วนส่วนผสมระหว่างน้ำหนักความไม่เป็นผลึกของซิลิกาต่อซิลิกาที่เป็นผลึก

DxxTxxT คือ โดอะคอมไมท์ผ่านการเผาที่ 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการเผา 4, 6 และ 8 ชั่วโมง

Q คือ เฟสควออร์ทไนโดอะคอมไมท์

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุแสดงในตารางที่ 1 เมื่อนำโดอะคอมไมท์มาตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray fluorescence Analysis พบว่ามีสารประกอบออกไซด์ของซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ไรออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 ค่า LOI ไม่มากกว่าร้อยละ 10 และ SO_3 ไม่มากกว่าร้อยละ 159 ppm. จึงจัดเป็นวัสดุปอซโซลานชั้น N ตามมาตรฐาน ASTM C618 (2001)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

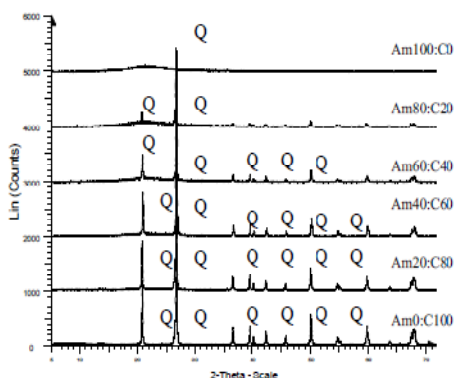
ปริมาณออกไซด์ (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	โดอะคอมไมท์
SiO_2	18.1	59.3
Al_2O_3	3.5	10
Fe_2O_3	3.6	18.5
CaO	67.5	1.2
K_2O	0.6	1.9
TiO_2	0.2	0.6
SO_3	3.3	159 ppm
Loss of Ignition (LOI)	1.5	8.1

4.2 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของสารมาตรฐานซิลิกา

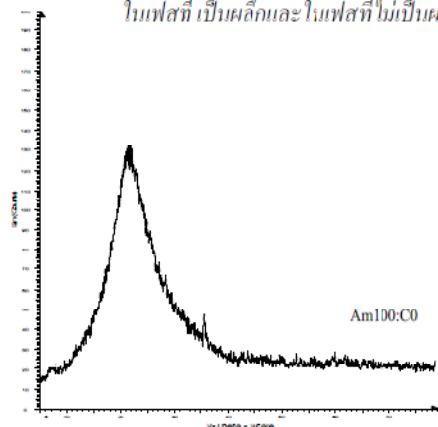
กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของสารมาตรฐานซิลิกาที่มีเฟสความไม่เป็นผลึก (Amorphous silica) และซิลิกาที่มีเฟสผลึก (Silica crytralyne) จากภาพที่ 1 ซิลิกาไดออกไซด์จะอยู่ในรูปของ Quartz ซึ่งตำแหน่งที่ชัดเจนมีมุม 2-Theta ประมาณ 22 และ 27 และแทนที่ด้วยซิลิกาที่ไม่เป็นผลึกมากขึ้นจะทำให้ความสูงของพีคลดลง และในกรณีที่แทนที่

ด้วยซิลิกาที่ไม่เป็นผลึกร้อยละ 100 มุม 2-Theta ที่ 22 องศา มีลักษณะป้อมและกว้างขึ้น ซึ่งจะสามารถสังเกตได้ในภาพที่ 2 พื้นที่ใต้พีคจะลดลงเรื่อยๆเมื่อแทนที่ด้วยซิลิกาที่เป็นผลึกมากขึ้นดังต่อไปนี้ Am100:C0, Am80:C20, Am60:C40, Am40:C60, Am20:C80 และ Am0:C100

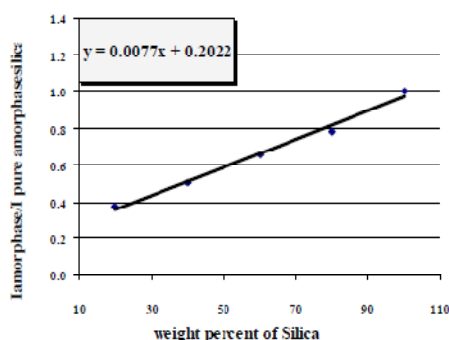
เมื่อพิจารณาภาพที่ 3 พบว่าเมื่ออัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของความไม่เป็นผลึกของซิลิกาในแต่ละส่วนผสมของต่อพื้นที่ใต้กราฟความไม่เป็นผลึกของซิลิการ้อยละ 100 เพิ่มขึ้นร้อยละ โดยนี้ เหน้กของทวมไม่เป็นผลึกของซิลิกาของซิลิกาก็จะมีมากขึ้นตามไปด้วย รูปร่างสมการจะอยู่ในรูปเส้นตรง



ภาพที่1 กราฟเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซิลิกามาตรฐาน ในเฟสที่เป็นผลึกและในเฟสที่ไม่เป็นผลึก



ภาพที่2 กราฟเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซิลิกามาตรฐาน ในเฟสที่ไม่เป็นผลึก (Amorphase Silica)



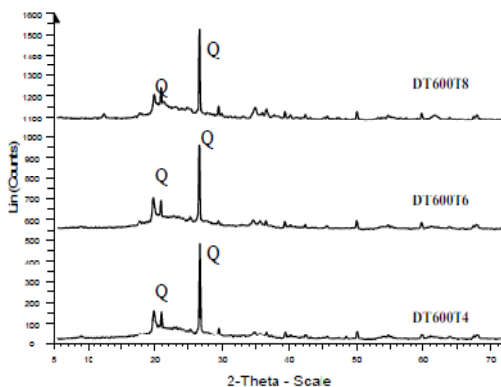
ภาพที่3 กราฟมาตรฐานความไม่เป็นผลึกของซิลิกา

4.3 ผลการหาร้อยละของความไม่เป็นผลึกซิลิกาของวัสดุ ตัวอย่าง

จากการสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อหาค่าร้อยละ โดยน้ำหนักของวัสดุที่มีความไม่เป็นผลึกของซิลิกา พบว่ากราฟจะเป็นกราฟเส้นตรงสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของความไม่เป็นผลึกของซิลิกาในแต่ละส่วนผสมต่อพื้นที่ใต้กราฟความไม่เป็นผลึกของซิลิการ้อยละ 100 และร้อยละ โดยน้ำหนักของความไม่เป็นผลึกในซิลิกาจะอยู่ในรูป

$$y = 0.0077x + 0.2022$$

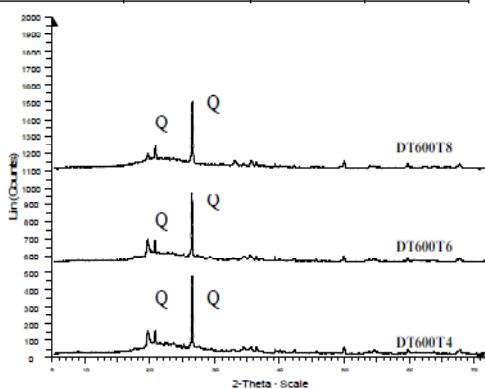
เมื่อพิจารณาภาพที่ 4, 5 และ6 พบว่าการเผาไดอะคอมไมท์ที่อุณหภูมิไม่เกิน 800 องศาเซลเซียสจะพบเพียงฟิสิกของ ควอตซ์ (quartz) เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าในการเผาถ้าเผาที่อุณหภูมิสูง จะต้องให้เวลาน้อยจึงจะทำให้วัสดุไม่เป็นผลึก จากการที่กำหนดให้ใช้อุณหภูมิสูงและเวลาในการเผาที่นาน ทำให้ผลที่ได้ครั้งนี้ออกมาในลักษณะตัวที่อุณหภูมิต่ำที่สุดมีความไม่เป็นผลึกมากที่สุด ในตารางที่ 2 พบว่าไดอะคอมไมท์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะมีปริมาณความไม่เป็นผลึกของซิลิกามากที่สุดคือมีถึงร้อยละ 85.8 โดยน้ำหนัก



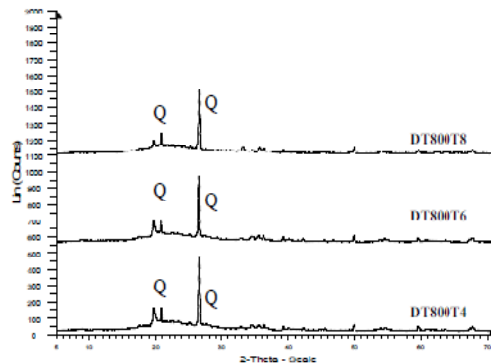
ภาพที่ 4 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของไคอะตอมไมท์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่เวลาการเผา 4,6 และ 8 ชั่วโมง

ตารางที่ 2 แสดงร้อยละโดยน้ำหนักความไม่บริสุทธิ์ของซิลิกา

Sample Name	Raw Area Cps x 2-Theta °	Imor/Ipure	weight percent of silica
DT600T4	379.7	0.8	85.8
DT600T6	363.8	0.7	81.0
DT600T8	353.0	0.7	77.8
DT700T4	340.7	0.7	74.0
DT700T6	330.3	0.6	70.9
DT700T8	325.8	0.6	69.5
DT800T4	314.0	0.6	65.0
DT800T6	308.4	0.6	64.3
DT800T8	299.1	0.6	61.5



ภาพที่ 5 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของไคอะตอมไมท์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่ 4,6 และ 8 ชั่วโมง



ภาพที่ 6 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของไคอะตอมไมท์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่เวลาการเผา 4,6 และ 8 ชั่วโมง

4.4 ผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์พิเศษ

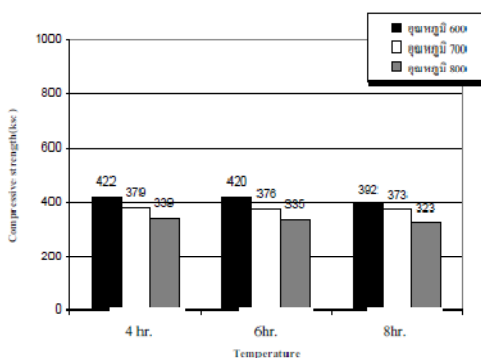
ตารางที่ 3 แสดงค่ากำลังอัดของซีเมนต์พิเศษที่อายุ 3,14 และ 28 วัน พบว่ากำลังอัดของซีเมนต์พิเศษควบคุมเท่ากับ 488, 587 และ 764 กก./ซม² ตามลำดับและทุกส่วนผสมค่ากำลังอัดต่ำกว่า ซีเมนต์พิเศษควบคุม การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยไคอะตอมไมท์ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่ อนุภาคเฉลี่ยใกล้เคียงปูนซีเมนต์ ไคอะตอมไมท์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสใช้ระยะเวลาในการเผา 4 ชั่วโมงมีกำลังอัดสูงที่สุด

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์พิเศษ

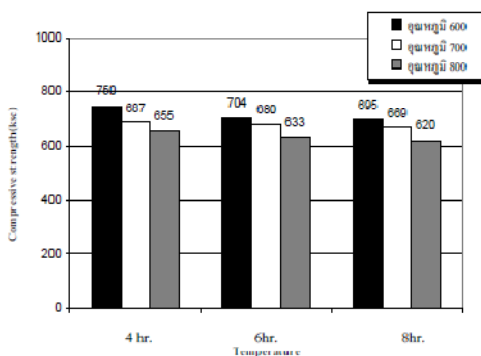
Sample	Compressive Strength(ksc.)-Percentage compress strength		
	3 days	14 days	28 days
Cement	488-100	587-100	764-100
DT600T4	421-86	542-92	749-98
DT600T6	419-85	501-85	704-92
DT600T8	391-80	494-84	695-91
DT700T4	378-77	491-83	687-89
DT700T6	376-77	487-83	679-88
DT700T8	373-76	462-78	669-87
DT800T4	339-69	453-77	655-85
DT800T6	335-68	449-76	633-82
DT800T8	322-66	439-74	620-81

4.5 ผลของอุณหภูมิการเผาต่อกำลังอัด

จากผลการผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์พิเศษที่แทนที่ด้วยร้อยละ 20 ของโคอะคอมไมท์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียสทดสอบกำลังรับแรงอัดเป็นเวลา 3, 14 และ 28 วันพบว่าโคอะคอมไมท์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสจะมีกำลังรับแรงอัดมากที่สุด รองลงมาจะเป็นโคอะคอมไมท์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และโคอะคอมไมท์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสจะมีกำลังรับแรงอัดน้อยที่สุดของการทดสอบทุกช่วงเวลา



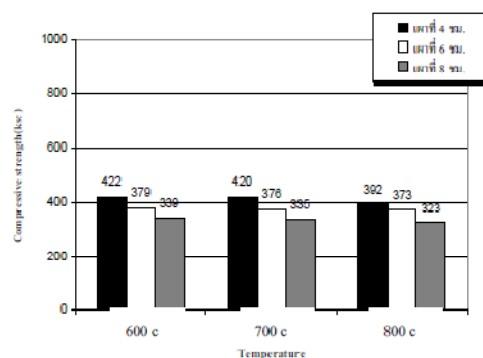
กราฟที่ 7 แสดงผลของอุณหภูมิและกำลังอัดที่เวลา 3 วัน



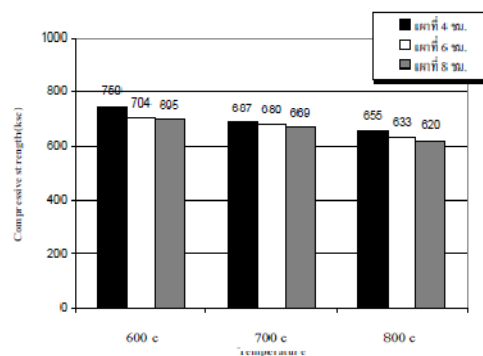
กราฟที่ 8 แสดงผลของอุณหภูมิและกำลังอัดที่เวลา 28 วัน

4.6 ผลของระยะเวลาในการเผาต่อกำลังอัด

จากผลการผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์พิเศษที่แทนที่ด้วยร้อยละ 20 ของโคอะคอมไมท์ที่ผ่านการเผาที่ระยะเวลา 4, 6 และ 8 ชั่วโมง 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 3, 14 และ 28 วันพบว่าโคอะคอมไมท์ที่ผ่านการเผาที่ 4 ชั่วโมงจะมีกำลังรับแรงอัดมากที่สุด รองลงมาจะเป็นโคอะคอมไมท์ที่ผ่านการเผาที่เวลา 6 ชั่วโมง และโคอะคอมไมท์ที่ผ่านการเผาที่เวลา 8 ชั่วโมงจะมีกำลังรับแรงอัดน้อยที่สุดของการทดสอบทุกช่วงเวลา



กราฟที่ 9 แสดงผลของเวลาต่อกำลังอัดที่เวลา 3 วัน



กราฟที่ 10 แสดงผลของเวลาต่อกำลังอัดที่เวลา 28 วัน

4.7 ผลของปริมาณความไม่บริสุทธิ์ของซิลิกาต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน

การหาการทำปฏิกิริยาได้ของโคอะตอมไมท์ที่นั่นหาได้โดยการนำทรายบดซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 [8] ซึ่งแสดงผลของปริมาณความไม่บริสุทธิ์ของซิลิกาต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานในซีเมนต์เพสต์แสดงไว้ในตารางที่ 4 พบว่าโคอะตอมไมท์ที่มีปริมาณความไม่บริสุทธิ์ของซิลิกายิ่งมากยิ่งมีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมากขึ้นตามไปด้วย โดยโคอะตอมไมท์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสใช้เวลา 4 ชั่วโมงมีการทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์มากที่สุดโดยการทำปฏิกิริยาร้อยละ 17.0

ตารางที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของความไม่

ตัวอย่าง	ร้อยละโดยน้ำหนักของปริมาณความไม่บริสุทธิ์ของซิลิกา	กำลังอัดที่ 28 วัน	กำลังอัดที่ด้วยทรายร้อยละ 20 ที่ 28 วัน	ร้อยละการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน
DT600T4	85	749	619	17
DT600T6	81	704	619	11
DT600T8	77	695	619	9
DT700T4	74	687	619	8
DT700T6	70	679	619	7
DT700T8	69	669	619	6
DT800T4	66	655	619	4
DT800T6	64	633	619	2
DT800T8	61	620	619	0

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาข้างต้นพบว่าปริมาณความไม่บริสุทธิ์ของซิลิกาเมื่อนำมาเชื่อมโยงกับกำลังอัดและความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้พบว่าปริมาณความไม่บริสุทธิ์ของซิลิกามีผลต่อกำลังอัดคือเมื่อปริมาณความไม่บริสุทธิ์ของซิลิกามีมากขึ้นกำลังอัดก็มากขึ้นเช่นกัน ในด้านความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้ของวัสดุปอซโซลานพบว่าปริมาณความไม่บริสุทธิ์ของซิลิกามีมากขึ้นความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน โดยการเผาโคอะตอมไมท์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเผา 4 ชั่วโมงจะให้

ปริมาณความไม่บริสุทธิ์ของซิลิกามากที่สุดคือ ร้อยละ 85.5 โดยน้ำหนัก

6. กิตติกรรมประกาศ

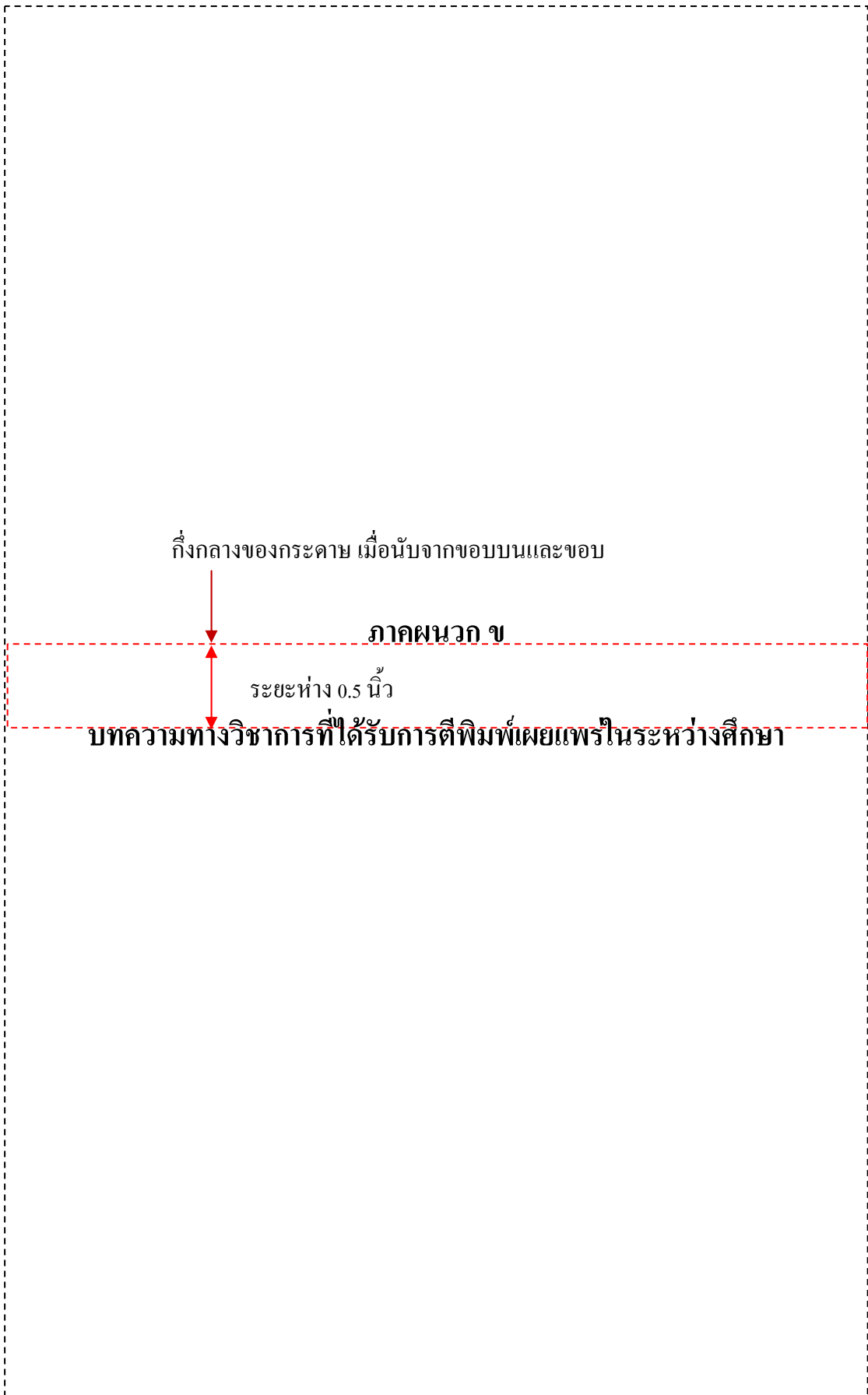
ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้มอบทุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Malhotra, V.M., 2002, Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology. *ACI Concrete International*, Vol. 24 (7), pp. 22.
- [2] Mehta, P.K., 2002, Greening of The Concrete Industry for Sustainable Development. *ACI Concrete International*, Vol. 24 (7), pp. 23-28.
- [3] ปริญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จตุรพิทักษ์กุล, 2547. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตไทย (ส.ค.ท.) : 346 หน้า
- [4] R.B. Owen, C. Utha-aroon, 1999. Diatomaceous sedimentation in the tertiary Lampang basin, northern Thailand, *J. Paleolimnol*, 22 : P 81-95.
- [5] K. Pimraksa and P. Chindaprasirt, 2008. Lightweight bricks made of diatomaceous earth, lime and gypsum.
- [6] Whiston, C. (1991). *X-ray Methods*. Singapore, John Wiley & Sons, Inc.
- [7] สุธรรม ศรีหล่มศักดิ์. (2543). เอกสารประกอบการสอน วิชา 524306 Ceramic Characterization เครื่อง X-ray Diffraction. สาขาวิศวกรรมเซรามิก. สำนักวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- [8] Jatuphom Tangpagasit, 2005. Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar. *Science direct*

1.5 นิ้ว นับจากขอบบน

1.5 นิ้ว นับ
จากขอบซ้าย



1 นิ้ว นับ
จากขอบขวา

1 นิ้ว นับจากขอบล่าง

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ปิยะฉัตร สุภวิทยาเจริญกุล วันโชค เครือหงส์ และธีรวัฒน์ สิ้นศิริ, (2553) ผลกระทบของปริมาณโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึกของธาตุซิลิกาในไดอะตอมไมท์ ต่อกำลังอัดและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในซีเมนต์พอสต์ผสม. การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติประจำปี 2553 ครั้งที่ 6 (ACC-6), หน้า 125-131

ปิยะฉัตร สุภวิทยาเจริญกุล และธีรวัฒน์ สิ้นศิริ, (2555) ผลกระทบของปริมาณซิลิกาอสัณฐานในเพอร์ไลต์ ต่อกำลังอัดและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในซีเมนต์พอสต์ผสม. วิศวกรรมสาร มข. (กำลังพิจารณา)



ประวัติผู้เขียน

นางสาวปิยะฉัตร ศุภวิทยาเจริญกุล เกิดเมื่อวันที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2528 เริ่มศึกษาชั้นประถมที่โรงเรียนเซนต์ยอแซฟ ท่าแร่ ชั้นประถมศึกษา 1-6 จังหวัดสกลนครและเข้าศึกษาต่อที่โรงเรียนสกลราชวิทยานุกูลระดับมัธยมศึกษา 1-6 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2552 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้เป็นผู้ช่วยสอนและวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา วิชาปฏิบัติการสำรวจและปฏิบัติการเทคโนโลยีคอนกรีต ซึ่งได้นำความรู้ที่ช่วยสอนมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี

ผลงานวิจัย : ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 6 ประจำปี พ.ศ.2553 เรื่อง ผลกระทบของปริมาณความไม่เป็นผลึกของธาตุซิลิกาในไดอะตอมไมท์ต่อกำลังอัดและการเกิดปฏิกิริยา