การพัฒนาคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์

DEVELOPMENT OF CONCRETE COMPOSITE BY PERLITE ADDITION

นางสาวปริชญา โชติรัตน์

MS. PARICHAYA CHOTIRAT

นางสาวอัญชลีพร สินธุสุข

MS. ANCHALEEPORN SINTHUSUK

นายเอกรินทร์ กะสายแก้ว

MR. EKKARIN KASAIKAEW

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF CONCRETE COMPOSITE BY PERLITE ADDITION

MS. PARICHAYA CHOTIRAT
MS. ANCHALEEPORN SINTHUSUK
MR. EKKARIN KASAIKAEW

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN
PRODUCTION DESIGN AND MATERIALS ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การพัฒนาคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์

DEVELOPMENT OF CONCRETE COMPOSITE BY PERLITE ADDITION

นักศึกษา

นางสาวปริชญา	โชติรัตน์	รหัสประจำตัว	61010635
นางสาวอัญชลีพร	สินธุสุข	รหัสประจำตัว	61011434
นายเอกรินทร์	กะสายแก้ว	รหัสประจำตัว	61011437

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

(ผศ.ดร.พชรพล ตัณฑวิรุฬห์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การพัฒนาคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์
นักศึกษา	นางสาวปริชญา โชติรัตน์
	นางสาวอัญชลีพร สินธุสุข
	นายเอกรินทร์ กะสายแก้ว
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
	สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2564
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ผศ.ดร.พชรพล ตัณฑวิรุฬห์

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุผสมที่นำมาใช้ทดแทนแร่ใยหินในการทำคอนกรีตโดยใช้เพอร์ไลท์แทนแร่ใยหิน โดยในปริญญานิพนธ์นี้ จะมุ่งเน้นถึงการลดน้ำหนักและลดการดูดซึมน้ำของคอนกรีตโดยการเลือกใช้วัสดุเพอร์ไลท์สำหรับทดแทนแร่ใยหิน เพอร์ไลท์เป็นวัสดุธรรมชาติที่มีน้ำหนักเบา มีความเป็นฉนวนและปลอดภัยมากกว่าแร่ใยหิน นอกจากนั้นยังมีการเติมเส้นใยแก้วทนด่างอัลคาไลน์ เพื่อช่วยเสริมความแข็งแรงของคอนกรีต โดยใช้วิธีทางสถิติเพื่อออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทดลองแบบผสม (Mixture design) มีส่วนผสมของชิ้นงานแบ่งออกเป็น 4 ปัจจัย คือ น้ำต่อปูนซีเมนต์ ทราย เพอร์ไลท์ และเส้นใยแก้วทนด่างอัลคาไลน์ คอนกรีตจะถูกอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องไฮโดรลิก หลังจากนั้นจะทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์ผล จากการทดลองพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความเค้นดัด การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นอย่างมีนัยสำคัญประกอบด้วยปัจจัยต้นทั้ง 4 คือ น้ำต่อปูนซีเมนต์ ทราย เพอร์ไลท์ และเส้นใยแก้วทนด่างอัลคาไลน์ โดยจากการวิเคราะห์สมการการถดถอยได้ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อความเค้นดัดเป็นไปตามสมการ Bending stress = 275A + 81B + 692C + 71D - 610AB - 1541AC - 761AD - 656BC - 127BD การดูดซึมน้ำเป็นไปตามสมการ Water absorption = - 2789A - 799B + 398C - 1423D + 6767AB + 8575AC + 6913AD - 3858BC + 1041BD และความหนาแน่นเป็นไปตามสมการ Density = - 163079A - 47541B + 108195C - 86661D + 407010AB + 378037AC + 418190AD - 329709BC + 26381BD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Development of Concrete Composite By Perlite Addition
Student	Ms. Parichaya Chotirat
	Ms. Anchaleeporn Sinthusuk
	Mr. Ekkarin Kasaikeaw
Degree	Bachelor of Engineering in
	Production Design and Materials Engineering
	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2021
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Phacharaphon Tunthawiroon

ABSTRACT

This research paper aims to develop the property of the asbestos-free concrete composite. The reduction of density and water absorption is mainly focused on this research. Perlite is used as the filler materials to replace the asbestos. In addition to perlite, glass fiber is also added to concrete composite for strengthening. In the experiment, mixture design method is used to determine the different formulation to be investigated. The concrete composite bars were prepared by compression molding process. The properties was determined in accordance with ASTM standard. Results show that the amount of water/cement sand perlite and fiber glass is significantly affected on the bending stress, water absorption and density of concrete composite. Based on the regression analysis among the variables used, the regression equation was obtained as Bending stress = 275A + 81B + 692C + 71D - 610AB - 1541AC - 761AD - 656BC – 127BD. The regression equation was obtained as Water Absorption = - 2789A - 799B + 398C - 1423D + 6767AB + 8575AC + 6913AD - 3858BC + 1041BD. And the regression equation was obtained as Density = - 163079A - 47541B + 108195C - 86661D + 407010AB + 378037AC + 418190AD - 329709BC + 26381BD.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.พชรพล ตัณฑวิรุฬห์ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ.ดร.เมตยา กิตติวรรณ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะแนวทางการดำเนินงานตลอดจนให้ความรู้และคำปรึกษาที่ดีต่อปริญญานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณ พี่จิรา พัฒนวริศ และ พี่ศิริวรรณ เทพรัตนะ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะแนวทางการดำเนินงานตลอดจนให้ความรู้และคำปรึกษาที่ดีต่อปริญญานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์สำหรับการสนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่ในการทำงานวิจัย ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน สำหรับความรู้ที่ได้รับตลอดการศึกษาในปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอขอบคุณครอบครัวรวมไปถึงบุคคลที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวนามตลอดจนเพื่อนที่ให้กำลังใจจนสามารถดำเนินโครงงานปริญญานิพนธ์ได้เสร็จสมบูรณ์

นางสาวปริชญา โชติรัตน์
นางสาวอัญชลีพร สินธุสุข
นายเอกรินทร์ กะสายแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย ..... **ก**

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... **ข**

กิตติกรรมประกาศ ..... **ค**

สารบัญ ..... **ง**

สารบัญตาราง ..... **ช**

สารบัญรูป ..... **ซ**

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตการศึกษางานวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

1.5 แผนการดำเนินงาน 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แร่ใยหิน 4

2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแร่ใยหิน 4

2.1.2 การใช้แร่ใยหินในประเทศไทย (Uses of asbestos in Thailand) 7

2.1.3 ผลกระทบต่อสุขภาพ (Health concerns) 8

2.1.4 กฎระเบียบเกี่ยวกับใยหิน 12

2.1.5 กฎหมายที่เกี่ยวข้องกับแร่ใยหินในประเทศไทย 13

2.2 คอนกรีต 15

2.2.1 ปูนซีเมนต์ 16

2.2.2 น้ำ 18

2.2.3 ทราย 24

2.2.4 การบ่มคอนกรีต 26

2.3 เพอร์ไลท์ 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ 30
2.3.2 คุณสมบัติทางเคมี 30
2.3.3 การใช้ประโยชน์ 31
2.3.4 แหล่งผลิตเพอร์ไลท์ของประเทศไทย 34
2.4 เส้นใยแก้วทนด่างอัลคาไลน์ 34
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 35
2.6 การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture design) 36
2.6.1 การออกแบบแบบเชฟเฟ่ซิมเพล็กซ์แล็คทิส (Scheffe' simplex-lacttice) 36
2.6.2 การออกแบบแบบเชฟเฟ่ซิมเพล็กซ์เซนทรอยด์ (Scheffe' simplex-centroid) 37
2.6.3 การออกแบบแบบซิมเพล็กซ์แอคเซียล (Simplex-axial) 37
2.6.4 การออกแบบแบบเอ็กซ์ทรีมเวอร์ทิส (Extreme vertices) 38
2.7 แบบจำลองการถดถอย (Regression model) 38
2.7.1 แบบจำลองการถดถอยสำหรับการทดลองส่วนผสม (Mixture design) 38

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

3.1 การออกแบบการทดลอง 40
3.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน 42
3.3 การเตรียมชิ้นงาน 48
3.4 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ 48
3.4.1 การทดสอบความเค้นดัด (Benndding test) 48
3.4.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) 51
3.4.3 การทดสอบความหนาแน่น (Density) 52
3.4 การวิเคราะห์ผลสมบัติต่าง ๆ ผ่านโปรแกรม Minitab 53
3.5 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ 54

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์พื้นผิวหน้าชิ้นงาน 55
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ 56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความเค้นดัด 56
4.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ 60
4.2.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความหนาแน่น 64

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง 68
5.2 ข้อเสนอแนะ 68

เอกสารอ้างอิง 69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน....3
ตารางที่ 2.1 แสดงชนิด ลักษณะ และการใช้งานของใยหิน.... 5
ตารางที่ 2.2 ปริมาณการนำเข้าแร่ใยหิน 8
ตารางที่ 2.3 กฎหมายที่เกี่ยวข้องกับแร่ใยหินในประเทศไทย 14
ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ 16
ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดทั่วไปเกี่ยวกับน้ำผสมคอนกรีต 19
ตารางที่ 2.6 ข้อกำหนดความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้และผลกระทบของสิ่งเจือปนในน้ำผสมคอนกรีต 20
ตารางที่ 2.7 ขนาดของทราย 26
ตารางที่ 2.8 ประโยชน์ของการใช้งานทราย 26
ตารางที่ 2.9 วิธีการบ่มโดยเพิ่มความชื้น 28
ตารางที่ 2.10 วิธีป้องกันการเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต 29
ตารางที่ 2.11 สารประกอบออกไซด์ของเพอร์ไลท์ 31
ตารางที่ 2.12 ข้อมูลจำเพาะของแร่ใยแก้วทนด่างอัลคาไลน์ 35
ตารางที่ 2.13 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตแบ่งตามการใช้งานประเภทต่าง ๆ 36
ตารางที่ 3.1 แสดงการจำกัดสัดส่วนของปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ 41
ตารางที่ 3.2 แสดงส่วนผสมของคอนกรีตคอมโพสิตที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ 41
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความเค้นดัดมากสุดของคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์....56
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับความเค้นดัดมากสุดของคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์ 57
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการทำนายและการทดสอบของความเค้นดัด 59
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์.... 60
ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับการดูดซึมน้ำของคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์.... 61
ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการทำนายและการทดสอบของการดูดซึมน้ำ.... 63
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์.... 64
ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับความหนาแน่นของคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์.... 65
ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการทำนายและการทดสอบของความหนาแน่น.... 67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 ลักษณะของใยหิน (Chrysotile) ที่ใช้ในปัจจุบัน 5
รูปที่ 2.2 ปอดของผู้ป่วยโรคแอสเบสโตสิส (Asbestosis) 10
รูปที่ 2.3 โรคมะเร็งปอดเนื่องจากแร่ใยหิน (Lung cancer) 10
รูปที่ 2.4 โรคเมโสเธลิโอมา (Mesothelioma) 11
รูปที่ 2.5 การเรียกชื่อองค์ประกอบต่าง ๆ ของคอนกรีต 16
รูปที่ 2.6 ปูนซีเมนต์ 17
รูปที่ 2.7 น้ำ 18
รูปที่ 2.8 ลักษณะของทรายหยาบ ทรายกลาง และทรายละเอียด 25
รูปที่ 2.9 กราฟแสดงกำลังอัดของระยะเวลาในการบ่มแต่ละวิธี 27
รูปที่ 2.10 เพอร์ไลท์ที่ผ่านกระบวนการเผาและขยายตัว 30
รูปที่ 2.11 เส้นใยแก้ว 34
รูปที่ 2.12 การออกแบบแบบเชฟเฟ่ซิมเพล็กซ์แล็คทิส (Scheffe’ simplex-lacttice) 37
รูปที่ 2.13 การออกแบบแบบเชฟเฟ่ซิมเพล็กซ์เซนทรอยด์ (Scheffe’ simplex-centroid) 37
รูปที่ 2.14 การออกแบบแบบซิมเพล็กซ์แอคเซียล (Simplex-axial) 37
รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ 42
รูปที่ 3.2 เพอร์ไลท์ 42
รูปที่ 3.3 ทราย 43
รูปที่ 3.4 เส้นใยแก้วอัลคาไลน์ 43
รูปที่ 3.5 น้ำ 43
รูปที่ 3.6 การตวงและชั่งส่วนผสม 44
รูปที่ 3.7 การผสมส่วนผสมให้เข้ากัน 44
รูปที่ 3.8 การผสมน้ำลงในส่วนผสม 45
รูปที่ 3.9 การใช้เครื่องผสมผสมส่วนผสม 45
รูปที่ 3.10 การเทส่วนผสมลงในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป 45
รูปที่ 3.11 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิก 46
รูปที่ 3.12 การถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ 46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.13 การบ่มชิ้นงานด้วยการพรมน้ำ 47
รูปที่ 3.14 การอบชิ้นงานในเตาเพื่อให้ชิ้นงานแห้ง 47
รูปที่ 3.15 ลักษณะทางกายภาพและขนาดของชิ้นงาน 48
รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบ Shimadu AG-X, Japan 49
รูปที่ 3.17 การดัดแบบ 3 จุดเพื่อรับความเค้นดัด 49
รูปที่ 3.18 การดัดแบบ 3 จุดเพื่อรับความเค้นดัด 50
รูปที่ 3.19 โปรแกรม TRAPEZIUM X 50
รูปที่ 3.20 ตัวอย่างผลลัพธ์จากโปรแกรม TRAPEZIUM X 51
รูปที่ 3.21 แสดงขั้นตอนการทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำ 51
รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการหาความหนาแน่น 52
รูปที่ 3.23 การวิเคราะห์ผลแบบ Regression for mixtures 53
รูปที่ 3.24 การวิเคราะห์ผลแบบ Contour plot 54
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างชิ้นงานจากสูตรผสมทั้ง 17 สูตรหลังจากการอบไล่ความชื้น 55
รูปที่ 4.2 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลการทดลองของความเค้นดัด 57
รูปที่ 4.3 กราฟพื้นที่ผิวสำหรับความเค้นดัด 58
รูปที่ 4.4 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลการทดลองของการดูดซึมน้ำ 61
รูปที่ 4.5 กราฟพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซึมน้ำ 62
รูปที่ 4.6 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลการทดลองของความหนาแน่น 65
รูปที่ 4.7 กราฟพื้นที่ผิวสำหรับความหนาแน่น 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

บทนี้จะกล่าวเกี่ยวกับความเป็นมาและความสำคัญในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ โดยทางคณะผู้จัดทำได้บรรยายถึงข้อมูลทั่วไปและปัญหาที่พบ รวมไปถึงแนวทางดำเนินงานการแก้ไขปัญหา โดยใช้เครื่องมือและเทคนิคทางวิศวกรรม มีรายละเลียดดังนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.3 ขอบเขตการศึกษางานวิจัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5 แผนการดำเนินงาน

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ เพื่อประโยชน์ใช้สอยสำหรับงานก่อสร้างหรืองานโครงสร้าง มีปรากฏให้ผู้บริโภคเลือกใช้อย่างหลากหลายในท้องตลาด ทั้งนี้เพื่อใช้ประโยชน์สำหรับสร้างที่พักอาศัย สร้างอาคารขนาดเล็กรวมถึงสิ่งก่อสร้างและอาคารขนาดใหญ่ เช่น การสร้างสถานีรถไฟฟ้าที่สามารถพบได้ทั่วไปในเขตกรุงเทพมหานคร เป็นต้น ในวัสดุก่อสร้างหลายชนิด มีการนำแร่ใยหินผสมเป็นส่วนประกอบเพื่อเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์ เช่น กระเบื้องมุงหลังคา แผ่นยิปซัม ผนังห้องสำเร็จรูป กระเบื้องปูพื้น เป็นต้น

แร่ใยหินเป็นแร่ชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีลักษณะเป็นเส้นใย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยหินนี้ อาจเล็กกว่า 3 ไมครอน [1] เมื่อร่างกายได้รับแร่ใยหินจากการสูดดม กลืนกิน หรือสัมผัสร่างกาย ร่างกายจะไม่สามารถขับออกมาได้ จึงอาจทำให้เกิดการสะสมของแร่ใยหินภายในร่างกาย เมื่อร่างกายได้รับการสะสมเป็นเวลานาน ส่งผลก่อให้เกิดโรคภัยต่าง ๆ ได้ โดยเฉพาะโรคที่เกี่ยวกับระบบหายใจ เช่น โรคมะเร็งปอด โรคมะเร็งเยื่อหุ้มปอด เป็นต้น [2]

จากภัยที่เกิดจากแร่ใยหินดังที่กล่าวมา องค์การอนามัยโลก (WHO) และ องค์การแรงงานระหว่างประเทศ (ILO) ได้ร่วมมือกันดำเนินการตามมติเกี่ยวกับแร่ใยหิน ซึ่งรับรองโดยการประชุมแรงงานระหว่างประเทศครั้งที่ 95 จะกำจัดโรคที่เกี่ยวข้องกับแร่ใยหินทั่วโลก [3] ซึ่งมีมากกว่า 50 ประเทศ ได้สั่งห้ามการใช้แร่ใยหินทุกรูปแบบ [4] และเริ่มมีการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่ปราศจากการใช้แร่ใยหิน ซึ่งในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์ซีเมนต์บอร์ดหรือแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมาร์ทบอร์ดอเนกประสงค์ เป็นวัสดุคอมโพสิตที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับทดแทนกระเบื้องมุงหลังคา ฝ้า เพดาน ผนังห้อง และกระเบื้องปูพื้นที่มีส่วนผสมของแร่ใยหิน ซึ่งมีความอันตรายดังที่กล่าวมาก่อนหน้า ในการพัฒนาสมาร์ทบอร์ดอเนกประสงค์เหล่านี้ ได้มีการนำเส้นใยจากธรรมชาติที่มีคุณสมบัติแข็งแรงเหนียวและไม่เป็นพิษเข้ามาใช้แทนแร่ใยหินเพื่อลดความอันตรายต่อสุขภาพ แต่ปัญหาที่พบเจอคือ ไฟเบอร์ซีเมนต์บอร์ดยังมีน้ำหนักอยู่มาก เมื่อนำไปใช้งานเป็นกระเบื้องหลังคา เพดาน หรือผนัง อาจทำให้ตัวโครงสร้างเสียหายได้ง่าย อีกทั้งคอนกรีตนั้นมีการสะสมความร้อนสูง เนื่องจากคอนกรีตมีความหนาแน่นมาก [5] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการแก้ไขปัญหาและศึกษาเพื่อหาวิธีลดน้ำหนักของคอนกรีตให้เบาลง และทำให้คอนกรีตสามารถระบายความร้อนได้ดียิ่งขึ้น โดยการเติมส่วนผสมที่มีความพรุนตัวสูง โดยมีการคาดการณ์ว่าวัสดุที่มีความพรุนในตัวสูงนี้จะช่วยลดน้ำหนักให้เบาลงและเป็นฉนวนกันความร้อนให้กับคอนกรีตได้

เพอร์ไลท์เป็นวัสดุธรรมชาติที่เกิดจากการสลายตัวของหินภูเขาไฟ เมื่อได้รับความร้อนประมาณ 900-1,200 องศาเซลเซียส จะเกิดการขยายตัวได้สูงถึง 5-20 เท่าของปริมาตรเดิม [6] ทำให้หินเพอร์ไลท์นี้มีความพรุนสูง มีน้ำหนักเบา และเป็นฉนวน [7] ด้วยปัจจัยนี้ เพอร์ไลท์จึงถูกเลือกมาเผสมเข้ากับคอนกรีตเพื่อลดน้ำหนัก และในเวลาเดียวกัน ความพรุนในเพอร์ไลท์จะเพิ่มช่องว่างให้กับคอนกรีตเป็นการลดการนำความร้อนผ่านคอนกรีตด้วยอีกทาง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาวัสดุผสมที่นำมาใช้ทดแทนแร่ใยหินในการทำคอนกรีตโดยใช้เพอร์ไลท์แทนแร่ใยหิน

1.3 ขอบเขตการศึกษางานวิจัย

1. ไฟเบอร์ซีเมนต์บอร์ดที่ใช้สำหรับมุงหลังคาเท่านั้น
2. ส่วนผสมหลักที่ใช้จะประกอบไปด้วยปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ เพอร์ไลท์ และเส้นใยแก้วทนด่างอัลคาไลน์
3. การออกแบบอัตราส่วนผสมจะใช้วิธี Mixture design ประเภท Extreme vertices design

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเพอร์ไลท์และมีคุณสมบัติคล้ายไฟเบอร์ซีเมนต์บอร์ดที่จำหน่ายทั่วไป
2. ได้คอนกรีตคอมโพสิตที่มีน้ำหนักเบากว่าเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินงาน

งานวิจัยฉบับนี้ มีแผนการดำเนินงานดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

รายการ	บทที่	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษาเนื้อหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	1, 2									
2. ค้นคว้าหาข้อมูล และเครื่องมือที่ใช้	2									
3. ออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม	3									
4. ขึ้นรูปชิ้นงาน	3									
5. ทดสอบสมบัติของชิ้นงาน	3									
6. วิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดลอง	4									
7. สรุปผลการวิจัย	5									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ดำเนินงานวิจัยได้ทำการศึกษาทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้ในการดำเนินการทดลองตามแผนที่วางไว้ ตลอดจนวิเคราะห์ข้อมูล โดยทำการศึกษาหัวข้อที่เกี่ยวข้องดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 แร่ใยหิน

2.2 คอนกรีตคอมโพสิต

2.3 เพอร์ไลท์

2.4 เส้นใยทนด่างอัลคาไลน์

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6 การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture design)

2.7 แบบจำลองการถดถอย (Regression model)

2.1 แร่ใยหิน

2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแร่ใยหิน

แร่ใยหิน (Asbestos) เป็นชื่อทั่วไปที่ใช้สำหรับเส้นใยแร่ซิลิเกต (Fibrous mineral silicates) ซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีลักษณะเป็นเส้นใยอยู่รวมกันเป็นมัด (Bundle) แสดงดังภาพที่ 2.1 เนื่องจากแร่ใยหินมีความแข็งแรง เหนียว มีความยืดหยุ่นสูง ทนทานต่อแรงดึง ทนต่อความร้อน กล่าวคือ สามารถทนต่อความร้อนได้สูงตั้งแต่ 700-1,000 องศาเซลเซียสขึ้นไป ทนต่อแรงดึงได้สูงตั้งแต่ 5,000-31,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีกรดและด่าง เชื้อจุลินทรีย์และการทำลายของแมลง [8] ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ แร่ใยหินจึงมีการใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะใช้เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมการผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแกร่ง ทนกรด ด่าง และทนความร้อนสูง เช่น การผลิตกระเบื้องใยหิน ท่อซีเมนต์ใยหิน ฝ้าเพดานฉนวนหุ้มกันไฟและความร้อน ผ้าเบรก-คลัทช์ กระเบื้องยางปูพื้น เสื้อผ้าป้องกันไฟและความร้อน โดยทั่วไปแล้วใยหินสามารถแบ่งได้เป็น 6 ประเภท ตามข้อกำหนดของ The US Environmental Protection Agency (EPA) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1 ลักษณะของใยหิน (Chrysotile) ที่ใช้ในปัจจุบัน [9]

ตารางที่ 2.1 แสดงชนิด ลักษณะ และการใช้งานของใยหิน [10]

ชนิดของแร่ใยหิน	**ลักษณะ**	**การใช้งาน**
ไครโซไทล์ (Chrysotile)	ส่วนใหญ่จะใช้ใยหินชนิดนี้การทำกระเบื้องมุงหลังคา การบุผนัง เพดาน กำแพง พื้นบ้านและสิ่งปลูกสร้างในทางอุตสาหกรรม ไครโซไทล์ยังถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมทำผ้าเบรกรถยนต์ ใยหินชนิดนี้จะเป็นที่นิยมกว่าใยหินชนิดอื่น	— ประเก็น — กระเบื้องปูพื้น — ฉนวนกันความร้อน — ผ้าเบรก — ท่อซีเมนต์ — กระเบื้องมุงหลังคา
อะโมไซท์ (Amosite)	ใยหินชนิดนี้จะรู้จักกันในชื่อใยหินสีน้ำตาล ต้นกำเนิดส่วนใหญ่จะอยู่ในแอฟริกา ส่วนใหญ่ใช้ในงานแผ่นพื้นซีเมนต์และฉนวนหุ้มท่อ สามารถใช้ในการผลิตแผงวงจรไฟฟ้าได้ (จะใช้ใยหินมากกว่า 40%) แผ่นกระเบื้องเพดานและผลิตภัณฑ์ฉนวนกันความร้อน หรือการใช้งานจะคล้าย ๆ ใยหินในกลุ่มแอมพิโบล	— แผ่นพื้นซีเมนต์ — ฉนวนกันความร้อน — ฉนวนหุ้มท่อประปา — ฉนวนหลังคาบ้าน — ฉนวนไฟฟ้า — ส่วนผสมกระเบื้องมุงหลังคา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงชนิด ลักษณะ และการใช้งานของใยหิน (ต่อ) [10]

ชนิดของแร่ใยหิน	ลักษณะ	การใช้งาน
ครอซิโดไลท์ (Crocidolite)	ใยหินชนิดนี้ถูกเรียกว่า ใยหินสีฟ้า หรือสีน้ำเงินเป็นใยหินที่ต้านทานความร้อนได้ดีที่สุด เหมืองแร่ส่วนใหญ่จะอยู่ในแอฟริกาใต้โบลิเวียและออสเตรเลีย ครอซิโดไลท์เป็นใยหินชนิดที่อันตรายที่สุดจะถูกใช้ในงานที่เกี่ยวกับความร้อน เช่น ฉนวนหม้อไอน้ำ และยังใช้ในการเคลือบผิวของท่อซีเมนต์และผลิตภัณฑ์ซีเมนต์	— ฝ้าเพดาน — อุปกรณ์ผจญเพลิง — แผ่นฉนวน — สารสเปรย์เคลือบผิว — กล่องแบตเตอรี่ — แผ่นพื้นซีเมนต์ — สารเคลือบสายไฟ — ฉนวนป้องกันความร้อน — ฉนวนเคลือบหม้อไอน้ำและเคลือบท่อไอน้ำ
ทรีโมไลท์ (Tremolite)	ใยหินชนิดนี้ไม่ได้ถูกใช้ทางด้านการค้าโดยตรง แต่ปนเปื้อนอยู่ในใยหินไครโซไทล์อะโมไซท์ และผงแป้งบางครั้งปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ใยหิน เช่น ฉนวน สาร ผลึกและวัสดุมุงหลังคา จะมีลักษณะเป็นสีขาว เขียว เทา และโปร่งใส ทรีโมไลท์จะประกอบไปด้วย แคลเซียม แมกนีเซียม ซิลิคอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน	— สีทาบ้าน — วัสดุอุดกันรั่ว — ฉนวนกันความร้อน — วัสดุมุงหลังคา — อุปกรณ์ท่อน้ำประปา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงชนิด ลักษณะ และการใช้งานของใยหิน (ต่อ) [10]

ชนิดของแร่ใยหิน	ลักษณะ	การใช้งาน
แอนโธฟิลไลท์ (Anthophyllite)	ใยหินชนิดนี้ แรกเริ่มจะมีแหล่งแร่อยู่ในฟินแลนด์จะมีลักษณะเป็นสีเทาอมน้ำตาลไม่ได้ถูกใช้ทางด้านการค้าโดยตรง แต่จะเป็นสารปนเปื้อนส่วนใหญ่จะพบในส่วนประกอบของกระเบื้องปูพื้น	— ปุ๋ย — สารเติมแต่งในดิน — สารปรับสภาพดิน — ฉนวนกันความร้อน — คอนกรีตทำสระว่ายน้ำ — วัสดุบรรจุภัณฑ์ — หลังคาป้องกันไฟ — ปูนขาว
แอคทิโนไลท์ (Actinolite)	ใยหินชนิดนี้จะมีลักษณะกระด้างและไม่ยืดหยุ่นเมื่อเปรียบเทียบกับใยหินชนิดอื่นส่วนใหญ่จะพบในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือลักษณะของหินแอคทิโนไลท์ไม่เคยถูกใช้ในด้านการค้าเลยแต่จะปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์บางชนิดของใยหิน	— วัสดุฉนวน — คอนกรีตที่ใช้สำหรับโครงสร้าง — อุปกรณ์ป้องกันไฟ

2.1.2 การใช้แร่ใยหินในประเทศไทย (Uses of asbestos in Thailand)

ประเทศไทยนำแร่ใยหินเข้ามาใช้ในอุตสาหกรรมเป็นระยะเวลามากกว่า 60 ปี ซึ่งในแต่ละปีมีการนำเข้าจากประเทศต่าง ๆ ได้แก่ รัสเซีย บราซิล แคนาดา ซิมบับเว และจีน เป็นจำนวนมาก จากตารางที่ 2.2 จะเห็นว่าในแต่ละปีมีการนำเข้ามาใช้ในอุตสาหกรรมกว่าแสนตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ปริมาณการนำเข้าแร่ใยหิน [11]

ปี	ปริมาณการนำเข้า (ตัน)
2550	86,525
2551	94,278
2552	102,739
2553	79,250
2554	81,411
2555	58,037
2556	53,130
รวม	**555,370**

ปัจจุบันใยหินที่ใช้ในอุตสาหกรรมไทยเป็นใยหินชนิดไครโซไทล์ซึ่งใช้กันมานานกว่า 60 ปี อุตสาหกรรมหลัก ๆ ที่ใช้แร่ใยหินเป็นส่วนประกอบคือ 5 สินค้า ได้แก่ กระเบื้องลอนคู่ กระเบื้องแผ่นเรียบ กระเบื้องยางปูพื้น ท่อซีเมนต์ เบรกและคลัทช์

2.1.3 ผลกระทบต่อสุขภาพ (Health concerns)

ในขณะที่แร่ใยหินให้ประโยชน์ในการนำไปใช้งานอย่างมากมาย แร่ใยหินยังปรากฏโทษต่อสุขภาพของผู้สัมผัสด้วย จากคุณสมบัติของแร่ใยหินที่มีลักษณะเป็นเส้นใยขนาดเล็กและฟุ้งกระจายได้ง่ายในบรรยากาศการทำงาน ปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้แร่ใยหินก่อให้เกิดโรค [12] คือ ปริมาณแร่ใยหินที่เข้าสู่ปอด ขนาดของเส้นใยต้องมีความยาวมากกว่า 5 ไมครอน และมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 3 ไมครอน และความคงทนของเส้นใยเมื่ออยู่ในปอด

จากที่ทราบแล้วว่าเส้นใยแร่ใยหินที่มีอันตรายต่อสุขภาพ ได้แก่ เส้นใยที่มีความยาวมากกว่า 5 ไมครอน และมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 3 ไมครอน และมีความทนทาน เมื่อหายใจรับเส้นใยเข้าสู่ปอดแล้ว เส้นใยจะสะสมและคงอยู่ในเนื้อเยื่อปอดตลอดไป เมื่อเส้นใยฝังอยู่ภายในเซลล์ปอด เม็ดเลือดขาวชนิดมาโครฟาส์กจะพยายามกำจัดสิ่งแปลกปลอม โดยการเข้าโอบล้อมเส้นใยไว้ในเซลล์ แล้วหลั่งเอ็นไซม์เพื่อที่จะย่อยทำลายเส้นใย แต่ไม่สามารถทำได้เนื่องจากเส้นใยสามารถทนต่อกรด และจากคุณลักษณะของเส้นใยที่มีปลายแหลมทั้งสองข้าง ทำให้เอ็นไซม์ที่อยู่ภายในเซลล์ของมาโครฟาส์กรั่วออกสู่ภายนอกเซลล์ เกิดการย่อยสลายเซลล์มาโครฟาสก์เองและปล่อยให้เส้นใยเป็นอิสระ กระบวนการโอบล้อมและทำลายเซลล์มาโครฟาส์กจะเริ่มใหม่อย่างต่อเนื่อง เอ็นไซม์ที่ไหลออกสู่ภายนอกเซลล์ มาโครฟาส์กนี้สามารถก่อให้เกิดความเสียหายให้กับเนื้อเยื่อปอดส่วนที่ดีได้ และสารเคมีที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

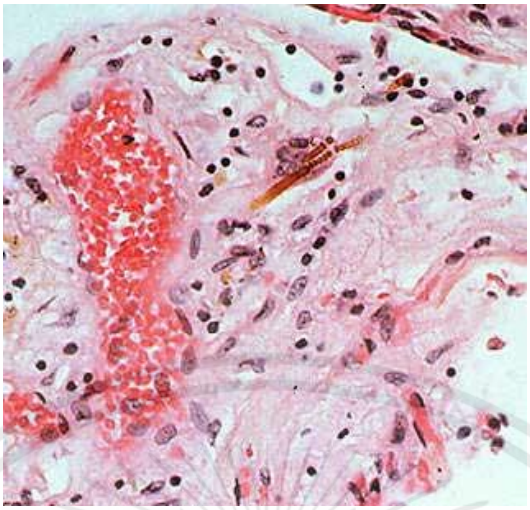
หลั่งออกก็ยังจะเรียกให้เซลล์ภูมิคุ้มกันอื่น ๆ มารุมล้อมในบริเวณนี้เพื่อทำลายเส้นใยอีกด้วย เนื่องจากเส้นใยมีความคงทนและคงอยู่ถาวรในร่างกาย กลไกการทำลายเส้นใย จะก่อให้เกิดการทำลายเซลล์ปอดและกลไกการซ่อมแซมเซลล์ปอด จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ซึ่งส่งผลให้เนื้อเยื่อปอดเกิดการอักเสบ เกิดเป็นพังผืด และสามารถพัฒนาจนก่อให้เกิดเป็นเซลล์มะเร็งได้ พัฒนาการของการเกิดโรคจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ เป็นระยะเวลานับ 10 ปี และเมื่อตรวจพบอาการของโรคก็จะไม่สามารถรักษาให้หายได้ ดังนั้น ผู้ป่วยจะต้องทุกข์ทรมานจากอาการของโรคปอดจนกว่าจะเสียชีวิต [13]

สำหรับเส้นใยที่มีความยาวกว่า 200 ไมครอนและเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 3 ไมครอน จะไม่สามารถเข้าสู่ถุงลมปอดได้ มักจะสะสมอยู่ในทางเดินหายใจส่วนบน และถูกกำจัดออกจากร่างกายโดยขับออกมากับเมือกเป็นเสมหะ ในขณะที่เส้นใยที่มีความยาวน้อยกว่า 5 ไมครอนและเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 2 ไมครอน จะถูกกลไกของร่างกายกำจัดได้ (Alveolar macrophages) จากการศึกษาวิจัยทั้งในสัตว์ทดลองและในมนุษย์ได้ระบุว่าแร่ใยหินทุกชนิด เป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ (Class 1) แร่ใยหินเข้าสู่ร่างกายทางจมูกโดยการหายใจเข้าไปในอวัยวะเป้าหมายสำคัญ คือ ปอด และจากผลการศึกษาทางระบาดวิทยาโดยเฉพาะในกลุ่มผู้ประกอบอาชีพที่เกี่ยว-ข้องกับแร่ใยหิน พบว่า แร่ใยหินทุกชนิดมีความสัมพันธ์กับการเกิดโรคแอสเบสโตสิส มะเร็งปอด มะเร็งเยื่อหุ้มปอด และเยื่อบุช่องท้อง [14]

<u>1. แอสเบสโตสิส (Asbestosis)</u>

เป็นโรคปอดเรื้อรังที่เกิดเฉพาะกับผู้ที่สัมผัสกับแร่ใยหินเท่านั้น เนื่องจากปฏิกิริยาทางชีวภาพระหว่างเส้นใยและแร่ใยหินกับเนื้อเยื่อปอด ทำให้ปอดเกิดเป็นแผลและไม่สามารถรักษาให้กลับคืนมาได้เหมือนเดิม ระยะเวลาในการก่อโรคยาวนานถึง 15-35 ปีหรืออาจเกิดขึ้นในระยะเวลาไม่กี่ปีหากสัมผัสในปริมาณที่สูงมาก การวินิจฉัยโรคทำได้โดยการดูประวัติการทำงานว่า เคยสัมผัสกับแร่ใยหิน ภาพถ่ายรังสีปอด และการตรวจสมรรถภาพปอด การวินิจฉัยโรค 12 ปีสำหรับผู้ป่วยระยะแรกตรวจพบโรคค่อนข้างยากโดยเฉพาะผู้ที่สัมผัสแร่ใยหินแล้วน้อยกว่า 20 ปี จึงมักพบผู้ป่วยด้วยโรคดังกล่าวต่อเมื่อมีอาการรุนแรงแล้ว อาการแสดงเริ่มแรกของโรคนี้ คือ ไอและหายใจหอบ มีช่วงการหายใจออกสั้น และจากการตรวจร่างกาย อาจสังเกตเห็นริมฝีปากและลิ้นหรือเล็บเป็นสีน้ำเงินคล้ำ และมีเสียงกรอบแกรบที่ฐานของปอด จากภาพถ่ายรังสีปอด จะเห็นจุดทึบเล็ก ๆ ดังแสดงภาพที่ 2.2 และมีสมรรถภาพการทำงานของปอดต่ำผู้ป่วยมีโอกาสเสี่ยงสูงที่จะพัฒนากลายเป็นมะเร็งปอด [11]

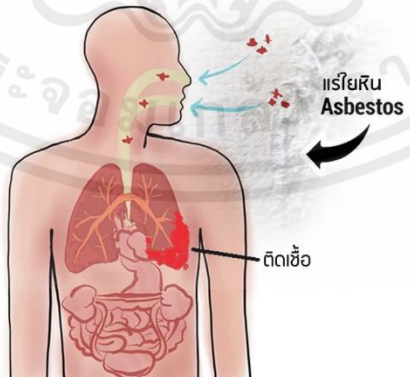
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ปอดของผู้ป่วยโรคแอสเบสโตสิส (Asbestosis) [15]

2. มะเร็งปอดเนื่องจากแร่ใยหิน (Lung cancer)

เป็นมะเร็งที่เกิดจากการสัมผัสกับแร่ใยหิน จากการศึกษาพบว่า ผู้ป่วยที่เป็นมะเร็งปอดและเคยทำงานสัมผัสแร่ใยหินในรูปแบบต่าง ๆ จะใช้ระยะเวลาในการก่อโรคประมาณ 20-30 ปี นอกจากนั้น ยังมีผลการศึกษาทางระบาดวิทยายืนยันว่า การสูบบุหรี่เพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งปอดในคนที่สัมผัสแร่ใยหิน โดยการสูบบุหรี่และการสัมผัสแร่ใยหินมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเสริมกัน (Synergistic effect) ผู้ที่สัมผัสแร่ใยหินและสูบบุหรี่จะทำให้ความเสี่ยงของการเกิดโรคมะเร็งปอดเพิ่มขึ้นถึง 10 เท่าเมื่อเทียบกับลูกจ้างที่สัมผัสแร่ใยหินแต่ไม่สูบบุหรี่ แต่จะมีความเสี่ยงมากกว่าผู้ที่ไม่ได้สัมผัสแร่ใยหินและไม่ได้สูบบุหรี่ถึง 90 เท่า [16,17]

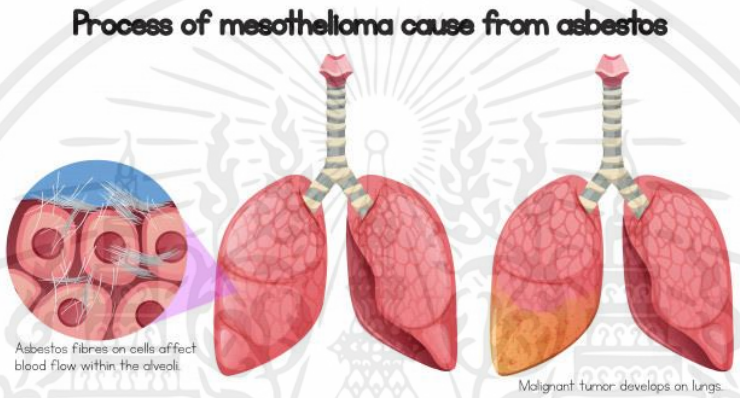


รูปที่ 2.3 โรคมะเร็งปอดเนื่องจากแร่ใยหิน (Lung cancer) [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. โรคเมโสเธลิโอมา (Mesothelioma)

เป็นมะเร็งที่เกิดขึ้นบริเวณเยื่อหุ้มปอดและเยื่อบุช่องท้อง โรคมะเร็งชนิดนี้พบได้ไม่บ่อย ส่วนมากจะพบในคนที่มีประวัติการสัมผัสกับแร่ใยหิน โดยเฉพาะผู้ที่มีระดับการสัมผัสแร่ใยหินที่สูง ก็จะมีความเสี่ยงในการเกิดโรคเมโสเธลิโอมามากขึ้น ใช้ระยะเวลาการก่อโรคประมาณ 35-40 ปี ผลการศึกษายังไม่สามารถระบุระดับการสัมผัสแร่ใยหินที่ไม่สามารถก่อให้เกิดโรคมะเร็งชนิดนี้ได้ และในปัจจุบันยังไม่มีวิธีการรักษาที่ได้ผล ส่วนใหญ่ผู้ป่วยจะเสียชีวิตหลังจากได้รับการวินิจฉัย 2-3 ปี โรคมะเร็งชนิดนี้สามารถเกิดขึ้นได้หลังจากสัมผัสแร่ใยหินถึง 50 ปี [19]



รูปที่ 2.4 โรคเมโสเธลิโอมา (Mesothelioma) [20]

สำหรับในประเทศไทย ตามสถิติของกองทุนเงินทดแทน สำนักงานประกันสังคม ยังไม่ปรากฏว่ามีสถิติการเกิดโรคปอดจากการทำงานสัมผัสแร่ใยหินหรือโรคแอสเบสโตสิสอย่างชัดเจน อาจเนื่องจากแพทย์ทั่วไปจะวินิจฉัยผู้ป่วยโรคมะเร็งปอดด้วยการฉายเอ็กซเรย์ธรรมดา ซึ่งเสียค่าใช้จ่ายไม่มาก จึงไม่สามารถจำแนกการเกิดโรคแอสเบสโตสิสได้ แต่ถ้าหากใช้การฉายเอ็กซเรย์ด้วยการทำซีทีสแกน ซึ่งเป็นการฉายเอ็กซเรย์ด้วยระบบคอมพิวเตอร์จะสามารถวินิจฉัยได้แน่นอนกว่า แต่มีค่าใช้จ่ายสูงประมาณ 5,000-6,000 บาท ซึ่งผู้ป่วยส่วนมากมีฐานะยากจน จึงไม่มีโอกาสได้ตรวจสอบด้วยการทำซีทีสแกน ตามปกติแล้ว การเกิดโรคนี้จะไม่เกิดแบบเฉียบพลัน แต่จะเป็นการเกิดโรคแบบสะสม เนื่องจากการได้รับเส้นใยแร่ใยหินต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน และอาการของโรคเหล่านี้ มักจะแสดงออกหลังจากสัมผัสครั้งแรกถึง 20 ปีหรือมากกว่านั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลาและปริมาณของแร่ใยหินที่เข้าสู่ปอด เหตุผลอีกประการหนึ่งคือ แรงงานในประเทศไทยส่วนมากเปลี่ยนสถานที่ทำงานกันบ่อย เมื่อเกิดอาการเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ ผู้ป่วยจะไม่ได้แจ้งแพทย์ให้ทราบว่าเคยสัมผัสแร่ใยหินในการทำงาน อาจทำให้ไม่ทราบว่า แร่ใยหินเป็นสาเหตุของโรค ไม่ทราบว่าสัมผัสแร่ใยหินในการทำงานหรือการสัมผัสแร่ใยหินผ่านมาเป็นเวลาหลายสิบปีจนไม่คิดว่าจะเกี่ยวข้องกับสาเหตุของการเกิดโรคได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 กฎระเบียบเกี่ยวกับใยหิน

จากการประชุมใหญ่ องค์การแรงงานระหว่างประเทศ (International Labour Conference: ILC) สมัยที่ 95 ในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2549 ที่ประชุมมีมติให้ประเทศสมาชิกห้ามและขจัดการใช้แร่ใยหินในทุกรูปแบบ และการ ประชุมวิชาการนานาชาติ Asian Asbestos Conference 2006 ซึ่งจัดขึ้นโดยกระทรวงสาธารณสุข ร่วมกับกระทรวงแรงงานเมื่อเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2549 ที่กรุงเทพมหานคร โดยการสนับสนุนขององค์การแรงงานระหว่างประเทศองค์การอนามัยโลก มีผู้เข้าประชุมจาก 26 ประเทศ ได้แก่ ภูมิภาคเอเชีย-แปซิฟิก แอฟริกา ยุโรป และอเมริกาเหนือ ได้มีข้อตกลงร่วมกันให้มีการดำเนินการดังนี้

1. การห้ามใช้แร่ใยหิน
2. การคุ้มครองแรงงานและสาธารณชน
3. การจัดให้มีการใช้สารอื่นทดแทน
4. การแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารเกี่ยวกับแร่ใยหิน
5. การป้องกันการเปลี่ยนถ่ายผลิตภัณฑ์แร่ใยหินไปประเทศที่กำลังพัฒนา
6. การกำหนดความรับผิดชอบทางสังคมในกลุ่มธุรกิจ
7. การเฝ้าระวังโรคจากแร่ใยหิน
8. ให้มีความร่วมมือระหว่างประเทศในการจัดการและควบคุมแร่ใยหิน

สำหรับประเทศไทยได้นำผลการประชุมดังกล่าวมาจัดทำยุทธศาสตร์การควบคุม และห้ามใช้กำจัดโรคที่เกี่ยวข้องกับแร่ใยหินดังนี้

ยุทธศาสตร์ที่ 1 การคุ้มครองแรงงานและสาธารณชน

ยุทธศาสตร์ที่ 2 การควบคุมป้องกันและการห้ามใช้แร่ใยหินในอุตสาหกรรม

ยุทธศาสตร์ที่ 3 ความร่วมมือระหว่างหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในทุกระดับ

ยุทธศาสตร์ที่ 4 การเฝ้าระวังและวินิจฉัยโรคที่เกี่ยวข้องกับแร่ใยหิน 15

ในปัจจุบันหลายประเทศได้มีการห้ามใช้แร่ใยหินในกระบวนการผลิต ซึ่งการห้ามใช้แร่ใยหินในต่างประเทศได้ดำเนินการมาเป็นเวลานานแล้ว ทั้งนี้ประเทศที่ประกาศยกเลิกการใช้แร่ใยหิน (National Asbestos Bans) ได้แก่ Argentina, Australia, Austria, Belgium, Chile, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Gabon, Germany, Greece, Honduras, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Japan, Kuwait, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Saudi Arabia, Seychelles, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland, United Kingdom, Uruguay [21,22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานประกอบกิจการจึงได้มีความตื่นตัวกับการใช้แร่ใยหินเป็นอย่างมาก และมีสถานประกอบกิจการบางแห่งให้ความสำคัญในเรื่องความรับผิดชอบทางสังคม จึงได้ใช้สารอื่นทดแทนแล้ว แต่เนื่องจากสถานประกอบการที่มีการใช้แร่ใยหินในกระบวนการผลิตจำนวนมาก ยังไม่มีความพร้อมในการเปลี่ยนมาใช้สารอื่นเข้ามาทดแทน ประเทศไทยจึงยังคงมีการนำเข้าแร่ใยหินเพื่อการผลิต ทั้งนี้มีความพยายามที่จะลดการนำเข้าแร่ใยหินเข้ามาอย่างต่อเนื่อง โดยกระทรวงอุตสาหกรรมซึ่งควบคุมดูแลพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 ได้กำหนดให้แร่ใยหินทุกประเภท ยกเว้นไครโซไทล์เป็นวัตถุอันตรายประเภทที่ 4 ห้ามนำเข้าในราชอาณาจักรสำหรับแร่ใยหินประเภทไครโซไทล์ยังคงกำหนดให้เป็นวัตถุอันตรายชนิด 3 การผลิต นำเข้า ส่งออก ครอบครอง ต้องรับอนุญาตตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 [10] ต่อมามีมติครม.เมื่อวันที่ 12 เมษายน พ.ศ. 2554 ให้ศึกษาแนวทางในการห้ามนำเข้าแร่ใยหินชนิดไครโซไทล์ และให้กระทรวงอุตสาหกรรมควบคุมแร่ใยหินชนิดไครโซไทล์ที่เป็นวัตถุดิบให้เป็นวัตถุอันตรายชนิดที่ 4 อย่างเร่งด่วน โดยห้ามไม่ให้มีการผลิต นำเข้า ส่งออกหรือมีไว้ในครอบครอง รวมถึงกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสำหรับสินค้าที่ใช้สารทดแทนแร่ใยหิน เช่น เยื่อกระดาษใยสังเคราะห์ และสารเคมีเพื่อมาทดแทนแร่ใยหิน เป็นต้น

2.1.5 กฎหมายที่เกี่ยวข้องกับแร่ใยหินในประเทศไทย

ประเทศส่วนใหญ่ในโลกยังอนุญาตให้มีการใช้ไครโซไทล์ตามกฎหารอย่างปลอดภัย เช่น ในประเทศสหรัฐอเมริกา มีการกำหนดกฎหมายการใช้แร่ใยหินมีความแตกต่างกัน ในประเทศแคนนาดามีการกำหนดและควบคุมการฟุ้งกระจายของแร่ใยหินในเหมืองอย่างเคร่งครัด และในประเทศไทยมีการกำหนดกฎหมายเกี่ยวกับแร่ใยหิน แสดงดังตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 กฎหมายที่เกี่ยวข้องกับแร่ใยหินในประเทศไทย

ข้อกฎหมายที่เกี่ยวข้อง	ข้อกำหนด
ประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่องความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับภาวะแวดล้อม (สารเคมี) ลงวันที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2520	- ห้ามมิให้นายจ้างให้ลูกจ้างทำงานในที่ที่มีปริมาณฝุ่นแร่ใยหินในบรรยากาศของการทำงานตลอดระยะเวลาการทำงานปกติโดยเฉลี่ยเกินกว่า 5 เส้นใยต่ออากาศ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร - ถ้าปริมาณฝุ่นแร่ใยหินในบรรยากาศของการทำงานเกิน 5 เส้นใยต่ออากาศ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ให้นายจ้างดำเนินการแก้ไขหรือปรับปรุงเพื่อลดความเข้มข้นของฝุ่นแร่ใยหิน ไม่ให้เกินกว่าที่กำหนดไว้ หากแก้ไขหรือปรับปรุงไม่ได้ต้องจัดให้ลูกจ้างสวมใส่อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลที่สามารถลดปริมาณฝุ่นแร่ใยหินตามมาตรฐานที่กำหนดไว้
ประกาศกระทรวงแรงงานเรื่องกำหนดชนิดของโรคซึ่งเกิดขึ้นตามลักษณะหรือสภาพของงานหรือเนื่องจากการทำงาน ลงวันที่ 24 กรกฎาคม พ.ศ. 2550	— กำหนดให้แอสเบสโตสิสเป็นโรคระบบหายใจที่เกิดขึ้นจากการทำงาน — กำหนดให้แร่ใยหินเป็นสารที่ทำให้เกิดโรคมะเร็งที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทำงาน
กฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2541) ออกตามความในพระราชบัญญัติคุ้มครองแรงงาน พ.ศ. 2541 ลงวันที่ 19 สิงหาคม พ.ศ. 2541	— ห้ามไม่ให้ลูกจ้างซึ่งเป็นเด็กอายุต่ำกว่าสิบแปดปีทำงานเกี่ยวกับสารเคมีที่เป็นอันตราย ซึ่งหมายความรวมถึงแร่ใยหินด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

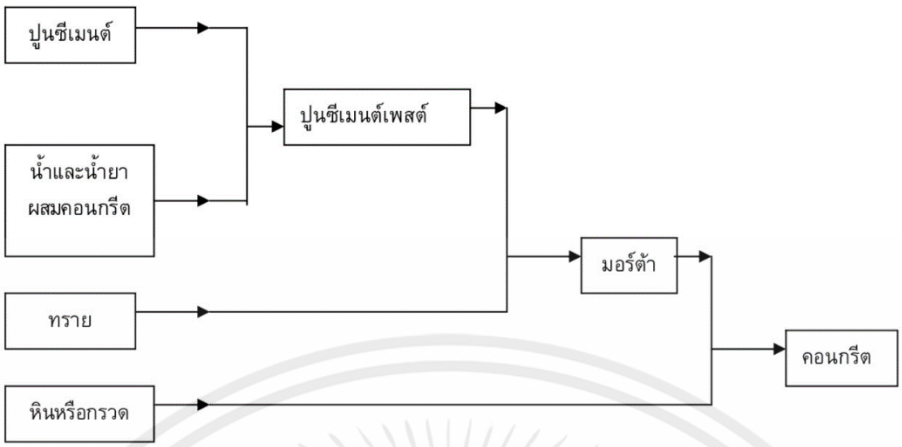
ตารางที่ 2.3 กฎหมายที่เกี่ยวข้องกับแร่ใยหินในประเทศไทย (ต่อ)

ข้อกฎหมายที่เกี่ยวข้อง	ข้อกำหนด
กฎกระทรวงกำหนดหลักเกณฑ์และวิธีการตรวจสุขภาพของลูกจ้าง และส่งผลการตรวจแก่พนักงานตรวจแรงงาน พ.ศ. 2547 ลงวันที่ 29 ธันวาคม พ.ศ. 2547	— กำหนดให้มีการตรวจสุขภาพของลูกจ้างที่ทำงานเกี่ยวกับปัจจัยเสี่ยงโดยแพทย์ปัจจุบันชั้นหนึ่งที่ได้รับใบอนุญาตประกอบวิชาชีพเวชกรรมด้านอาชีวเวชศาสตร์ตั้งแต่แรกรับเข้าทำงานและประจำปี ซึ่งตามประกาศกระทรวงแรงงานกำหนดให้แร่ใยหินเป็นสารเคมีอันตรายที่ต้องจัดให้มีการตรวจสุขภาพตามปัจจัยเสี่ยง — กำหนดให้นายจ้างจัดให้มีสมุดสุขภาพประจำตัวของลูกจ้างที่ทำงานเกี่ยวกับปัจจัยเสี่ยง บันทึกผลการตรวจสุขภาพและส่งผลการตรวจสุขภาพกรณีพบว่าผิดปกติ
พระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535	— ได้กำหนดให้แร่ใยหินประเภทไครโซไทล์เป็นวัตถุอันตรายชนิด 3 การผลิต นำเข้า ส่งออก ครอบครองต้องได้รับอนุญาตตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535

2.2 คอนกรีต

คอนกรีต (Concrete) หมายถึง วัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติหลายประการ เช่น มีความแข็งแรง มีความคงทนสูง ไม่ติดไฟ และที่สำคัญคือ ราคาไม่แพง เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็ก โดยทั่วไปคอนกรีตประกอบด้วยส่วนผสมพื้นฐาน 2 ส่วนคือ ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) ได้แก่ ปูนซีเมนต์และน้ำ มวลรวม (Aggregates) ได้แก่ มวลรวมละเอียดหรือทราย มวลรวมหยาบหรือหินกรวด [24] แสดงรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การเรียกชื่อองค์ประกอบต่าง ๆ ของคอนกรีต [25]

2.2.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่งที่ใช้แพร่หลายทั่วโลกในงานก่อสร้าง นับเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตคอนกรีต ปูนมอร์ตาร์ และปูนสูตรพิเศษประเภทต่าง ๆ มีส่วนผสมหลัก คือ หินปูน หินดินดาน ดินลูกรัง และทราย รวมถึงการเพิ่มสารอื่น ๆ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของปูนซีเมนต์ เช่น ยิปซัม สารปอซโซลาน สารลดน้ำ เป็นต้น [26] และมีส่วนประกอบทางเคมีแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ [27]

ส่วนประกอบทางเคมี	**% โดยน้ำหนัก**
$3CaO.SiO_2$	35-55
$2CaO.SiO_2$	15-35
$2CaO.Al_2O_3$	7-15
$4\ CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	5-10

ปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นผงละเอียด มีส่วนประกอบทางเคมีเป็นสารออกไซด์ เกิดการก่อตัวและการแข็งตัวได้ด้วยปฏิกิริยากับน้ำซึ่งเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration reaction) จะทำให้มีคุณสมบัติรับแรงได้ [28] ซึ่งสามารถจำแนกปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามการใช้งานได้เป็น 5 ประเภท ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ประเภท 1 (Type 1) : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary portland cement) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดนี้ ถูกนำไปใช้สำหรับงานก่อสร้างทั่วไป โดยส่วนมากจะนำไปใช้งานกับคอนกรีตเสริมเหล็กในการทำโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) เช่น สะพาน ถนน ท่อระบายน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้หากพูดถึงข้อเสียของปูนซีเมนต์ชนิดนี้คือ ไม่คงทนต่อสารที่เป็นด่างจากน้ำหรือดิน เช่น โรงงานอุตสาหกรรมผลิตสารเคมี

2. ประเภท 2 (Type 2) : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified portland cement) หากนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดนี้ไปผสมกับน้ำ จะทำให้มีการคายความร้อนออกมาปริมาณน้อยกว่าประเภทธรรมดาและมีความทนทานต่อความเป็นด่างระดับนึง จึงเหมาะสำหรับการก่อสร้างขนาดใหญ่ เช่น การทำเขื่อนเก็บน้ำ กำแพงกันดิน สะพานท่าเรือ เป็นต้น

3. ประเภท 3 (Type 3) : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดสูงเร็ว (High early strength portland cement) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้จะมีความละเอียดที่มาก ส่งผลให้เกิดการแข็งตัวและรับแรงได้เร็วกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง จึงเป็นที่นิยมในการนำไปใช้งานที่ต้องการความรวดเร็ว เร่งด่วน และคล่องตัว

4. ประเภท 4 (Type 4) : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low heat portland cement) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้เหมาะกับงานที่ต้องการคุมทั้งความร้อนและปริมาณที่เกิดขึ้นให้ได้น้อยที่สุด การเกิดกำลังของคอนกรีตที่มีส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 4 จะเป็นไปอย่างช้า ๆ เหมาะสำหรับงานก่อสร้างขนาดใหญ่ เช่น เขื่อนกันน้ำ เพราะสามารถทนทานต่อการแตกร้าวจากความร้อนได้มาก

5. ประเภท 5 (Type 5) : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตสูง (Sulfate resistance portland cement) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้เหมาะกับการใช้งานก่อสร้างที่ต้องสัมผัสกับบริเวณที่มีด่างสูง เช่น ดิน หรือทะเล เพราะมีคุณสมบัติในการต้านทานต่อสารที่เป็นด่างได้ดี ระยะเวลาในการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะช้าที่สุด [29]

รูปที่ 2.6 ปูนซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 น้ำ

น้ำ ถือว่าเป็นส่วนสำคัญในงานคอนกรีต นอกจากการใช้ในการผสมคอนกรีตแล้วยังใช้ในการบ่มคอนกรีต โดยทั่วไปหน้าที่หลัก ๆ ของน้ำ คือ ก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับปูนซีเมนต์ ทำให้ซีเมนต์มีความแข็งแรงมากขึ้น การเลือกน้ำที่จะนำมาผสมกับคอนกรีตจะต้องเป็นน้ำที่มีคุณภาพดี เพราะคุณภาพของน้ำที่นำมาผสมคอนกรีต จะส่งผลต่อคุณภาพของคอนกรีต เช่น การหดตัวของคอนกรีต ระยะเวลาในการก่อตัว เป็นต้น ดังนั้น จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการทดสอบคุณสมบัติของน้ำเสียก่อน

รูปที่ 2.7 น้ำ [30]

1. คุณภาพของน้ำผสมคอนกรีต

น้ำผสมคอนกรีตควรสะอาด ใส ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส และสามารถดื่มได้หรือถ้าไม่สามารถดื่มได้ ก็ควรมีคุณสมบัติผ่านข้อกำหนดของน้ำผสมคอนกรีตดังตารางที่ 2.5 โดยปกติน้ำประปาที่มีคุณสมบัติเหมาะแก่การบริโภคจะสามารถใช้ผสมคอนกรีตได้ ส่วนน้ำที่มีคลอไรด์ เช่น น้ำทะเล น้ำเค็มและน้ำกร่อยไม่เหมาะสำหรับผสมคอนกรีต เพราะจะส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดทั่วไปเกี่ยวกับน้ำผสมคอนกรีต

ชื่อสาร	**ความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้ (ppm หรือ มิลลิกรัมต่อลิตร)**
ตะกอนหรือสารแขวนลอย	50,000
ปริมาณซัลเฟต (SO_4^{2-})	3,000
ปริมาณคลอไรด์ (Cl^-)	
— คอนกรีตอัดแรง หรืองานสะพาน	500
— คอนกรีตเสริมเหล็กหรือมีโลหะเสริมอยู่ภายใน	1,000
— คอนกรีตไม่เสริมเหล็กและไม่มีโลหะฝังอยู่ภายใน	4,500
ด่าง (Na_2O + 0.658 K_2O)	600
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	อยู่ในช่วง 6-8

2. สิ่งเจือปนและข้อกำหนดของน้ำผสมคอนกรีต

นอกจากน้ำจะต้องมีคุณภาพแล้ว น้ำผสมคอนกรีตจะต้องไม่มีสิ่งเจือปนต่าง ๆ ที่ส่งผลเสียต่อคุณภาพของคอนกรีต ถ้าในน้ำผสมคอนกรีตมีสิ่งเจือปนอยู่มากเกินระดับหนึ่ง อาจก่อให้เกิดปัญหาทางคุณภาพได้ เช่น กำลังและความคงทนของคอนกรีตลดลง เวลาการก่อตัวเปลี่ยนแปลงไป คอนกรีตจะเกิดการหดตัวมากกว่าปกติหรืออาจจะมีการละลายของสารประกอบภายในคอนกรีตออกมาแข็งตัวบริเวณนอกคอนกรีต

สิ่งเจือปนที่ส่งผลเสียต่อคุณภาพของคอนกรีตมี 3 ประเภท คือ ตะกอน สารละลายอนินทรีย์ และสารละลายอินทรีย์ หากมีสิ่งเจือปนเหล่านี้มีปริมาณมากจะส่งผลต่อคอนกรีตมาก จึงมีการกำหนดความเข้มข้นของสิ่งเจือปน ดังตารางที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 ข้อกำหนดความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้และผลกระทบของสิ่งเจือปนในน้ำผสมคอนกรีต

สิ่งเจือปนในน้ำผสมคอนกรีต	**ความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้ (ppm หรือ มิลลิกรัมต่อลิตร)**	**ผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีต**
ตะกอน หรือ สารแขวนลอย เช่น ดินเลน ฝุ่น	50,000	— อาจทำให้ต้องใช้ปริมาณมากกว่าปกติ — การหดตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้น — อาจทำให้เกิดขี้เกลือบริเวณผิวคอนกรีต — ถ้าน้ำที่ใช้ขุ่นมากควรปล่อยให้ตกตะกอนเสียก่อน — บางครั้งอาจมีผลกระทบต่อการทำงานของสารกระจายกักฟองอากาศ
สารละลายอนินทรีย์	2,000	— ตามปกติสามารถใช้น้ำที่มีสารละลายอนินทรีย์ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 2,000 ต่อล้านได้อย่างปลอดภัย ยกเว้นสารละลายบางชนิด ดังรายละเอียดถัดไป
โซเดียมซัลไฟด์	100	— ควรหล่อคอนกรีตเพื่อทดสอบคุณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 ข้อกำหนดความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้และผลกระทบของสิ่งเจือปนในน้ำผสมคอนกรีต (ต่อ)

สิ่งเจือปนในน้ำผสมคอนกรีต	ความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้ (ppm หรือ มิลลิกรัมต่อลิตร)	ผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีต
เกลือโซเดียมคาร์บอเนต เกลือโซเดียมไบคาร์บอเนต	1,000	— พบทั่วไปในน้ำธรรมชาติ มีผลต่อการก่อตัวของปูนซีเมนต์และทำให้คอนกรีตมีกำลังลดลง — คาร์บอเนตอาจทำให้เวลาการก่อตัวลดลง — ไบคาร์บอเนตอาจเป็นตัวเร่งหรือตัวหน่วงในการก่อตัว
เกลือแคลเซียมคาร์บอเนต เกลือแมกนีเซียมคาร์บอเนต เกลือแคลเซียมไบคาร์บอเนต เกลือแมกนีเซียมไบคาร์บอเนต	400	
เกลือโซเดียมซัลเฟต	10,000	— อาจเพิ่มกำลังระยะแรก — แต่ในระยะยาว คอนกรีตจะมีกำลังลดลง เพราะเกลือซัลเฟตจะทำให้การตกผลึกของ ettringite ช้าลง
เกลือแมกนีเซียมซัลเฟต	40,000	
เกลือโซเดียมคลอไรด์	20,000	— ทำให้การก่อตัวเร็วขึ้น — เพิ่มกำลังระยะแรก — ทำให้กำลังในระยะยาวลดลง — บางครั้งมีการใช้สารละลายของแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารผสมเพิ่มในคอนกรีตเพื่อใช้เป็นตัวเร่งการก่อตัว แต่ไม่เหมาะกับคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตอัดแรง ทั้งนี้เพราะไอออนของคลอไรด์มีผลต่อการสึกกร่อนของเหล็กได้
เกลือแมกนีเซียมคลอไรด์	40,000	
เกลือแคลเซียมคลอไรด์	50,000	
น้ำที่เป็นกรด (กรดอนินทรีย์)	10,000 (pH ไม่ต่ำกว่า 4)	— น้ำที่เป็นกรดสูง หรือ pH ต่ำกว่า 4 มักก่อให้เกิดปัญหาด้านการก่อตัวและกำลังของคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 ข้อกำหนดความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้และผลกระทบของสิ่งเจือปนในน้ำผสมคอนกรีต (ต่อ)

สิ่งเจือปนในน้ำผสมคอนกรีต	**ความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้ (ppm หรือ มิลลิกรัมต่อลิตร)**	**ผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีต**
ฟอสเฟต (P_2O_5)	100	— ลดเวลาการก่อตัว — สารละลายที่มีความเข้มข้นสูงระดับนี้ เช่น น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งไม่ได้ผ่านระบบกำจัดสิ่งสกปรกหรือน้ำที่ซึมผ่านออกมาจากเหมืองแร่
ตะกั่ว (Pb^{2+}) และ สังกะสี (Zn^{2+})	100	
อาร์ซีเนต และบอเรทส์	500	
เกลือของทองแดง แมงกานีส และดีบุก	500	
น้ำที่เป็นด่าง (โซเดียมไฮดรอกไซด์ โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์)	500	— น้ำที่เป็นด่างสูง อาจก่อให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็วและกำลังของคอนกรีตลดลง
น้ำทะเล	35,000	— ในน้ำทะเลประกอบด้วยเกลือคลอไรด์และซัลเฟตของโซเดียมและแมกนีเซียม ประมาณ 3.5% ในจำนวนนี้เป็นเกลือโซเดียมคลอไรด์มากถึง 78% — ทำให้คอนกรีตก่อตัวและแข็งตัวเร็วขึ้น — ทำให้คอนกรีตมีกำลังในระยะแรกเพิ่มขึ้น — ในระยะยาวคอนกรีตจะมีกำลังลดลง เพราะเกลือซัลเฟตทำให้การตกผลึกของ Ettringite ช้าลง — ไอออนของคลอไรด์มีผลต่อการกัดกร่อนของเหล็กสนิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 ข้อกำหนดความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้และผลกระทบของสิ่งเจือปนในน้ำผสมคอนกรีต (ต่อ)

สิ่งเจือปนในน้ำผสมคอนกรีต	ความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้ (ppm หรือ มิลลิกรัมต่อลิตร)	ผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีต
สารละลายอินทรีย์	-	— สารประกอบอินทรีย์หลายชนิดในน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรมมักมีผลเสียต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่นหรือก่อให้เกิดฟองอากาศในปริมาณสูง จึงต้องระมัดระวังการใช้น้ำจากโรงงานอุตสาหกรรม ยกเว้นกรณีน้ำได้ผ่านโรงบำบัดน้ำเสีย ซึ่งสามารถลดปริมาณสารละลายอินทรีย์ลงได้
น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม	4,000	— มักทำให้กำลังลดลง
น้ำโสโครกจากท่อระบายน้ำ	400	— มักทำให้กำลังลดลง
น้ำตาล	100	— ถ้ามีปริมาณน้ำตาลน้อยในช่วง 300-1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำการก่อตัวช้าลง — ถ้ามีมากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป อาจเป็นตัวเร่งให้คอนกรีตแข็งตัวเร็วขึ้น
สาหร่าย หรือพืชขนาดเล็ก ๆ	1,000	— เกิดจากพืชที่พบในบ่อหรือในบริเวณที่ลุ่มกักน้ำ — ทำให้คอนกรีตมีช่องว่างอากาศมากและมีกำลังลดลง
น้ำมัน	2.0% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์	— ทำให้การก่อตัวช้าลง — ทำให้กำลังลดลง — กรณีน้ำมันจากพืชหรือสัตว์จะส่งผลกระทบน้อยกว่าน้ำมันชนิดอื่น ๆ เช่น น้ำมันแร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คุณภาพของน้ำบ่มคอนกรีต

น้ำที่ใช้ในการบ่มคอนกรีต ไม่จำเป็นต้องมีคุณภาพสูงเท่ากับน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต แต่ไม่ควรมีสิ่งเจือปนในน้ำบ่มคอนกรีตในปริมาณมากพอที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีต เช่น สารพวกซัลเฟต สารที่ทำให้เกิดคราบสกปรก น้ำมัน กรดและเกลือ เป็นต้น ซึ่งส่งผลทำให้ผิวคอนกรีตเกิดรอยเปื้อนถูกกัดกร่อนหรือเป็นตัวการทำให้คอนกรีตจับตัวกันไม่ดี และหลุดร่อนในภายหลังได้ [31]

2.2.3 ทราย

ทราย เป็นตัวอย่างหนึ่งของวัสดุจำพวกสสารแบบเม็ด (Granular matter) ตามธรรมชาติแล้ว ทรายเกิดจากหินที่ถูกย่อยเป็นเม็ดละเอียด ซึ่งหมายถึงทรายทั่ว ๆ ไปที่เราพบเห็นตามชายหาด แต่อีกความหมายหนึ่งในทางธรณีวิทยา หมายถึงชื่อขนาดของอนุภาคขนาดเม็ด "ทราย" ที่มีขนาด อนุภาคหรือเม็ดตะกอนระหว่าง 0.0625 ถึง 2 มิลลิเมตร อนุภาคหนึ่ง ๆ ของทรายนั้น เรียกว่า "เม็ดทราย" ขนาดของอนุภาคที่เล็กถัดลงไป เรียกว่า ทรายแป้ง (Silt) เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.0625 มิลลิเมตร จนถึง 0.004 มิลลิเมตร ส่วนขนาดของอนุภาคที่ใหญ่กว่าขนาดอนุภาคของทราย เรียกว่า กรวด (Gravel) อนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 2 ถึง 64 มิลลิเมตร (สามารถศึกษาการแบ่งขนาดของอนุภาคทางธรณีวิทยาได้จาก Grain size) เมื่อใช้นิ้วถูเบา ๆ ขนาดอนุภาคทรายนั้น จะให้ความรู้สึกสาก ส่วนอนุภาคทรายแป้งนั้นจะรู้สึกเหมือนนิ้วถูผงแป้ง แต่จะรู้สึกสาก ๆ เพียงเล็กน้อย

1. แหล่งที่เกิดของทราย

ทรายธรรมดามีแหล่งที่เกิดอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

1. ทรายบกหรือทรายบ่อ (Pit sand or bank sand) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ เกิดจากการแตกแยกเสียหายชำรุดของหินทราย (Sand stone) จะฝังอยู่ใต้พื้นดินเป็นแหล่ง ๆ ทรายชนิดนี้นิยมใช้มาก เนื่องจากมีลักษณะเป็นเหลี่ยม มีมุม แข็งแรง เหมาะแก่การผสมคอนกรีต เพราะการแทรกตัวของทราย จะทำให้เกิดช่องว่างของคอนกรีตลดน้อยลง ข้อเสียของทรายบกคือ มักจะมีดิน ซากพืชและซากสัตว์ปะปนอยู่ เวลาจะนำทรายไปใช้งาน จะต้องล้างหรือทำความสะอาดทรายเสียก่อน ปัจจุบันเป็นทรายที่หาได้ยาก

2. ทรายแม่น้ำ (River sand) ทรายชนิดนี้ถูกภัยจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติพัดพาหรือนำมาจากที่อื่นรวมตัวกันอยู่ในแถบราบลุ่ม ตามท้องแม่น้ำ ลำคลองปัจจุบันใช้ทรายชนิดนี้มาก เพราะสามารถหาได้ง่าย เพราะมีลักษณะกลมเกลี้ยงสะอาด เนื่องจากการพัดพาของน้ำทำให้สิ่งสกปรกที่ติดอยู่กับทรายตกหล่นระหว่างทาง ขณะที่ถูกพัดพามากับน้ำนั้น เม็ดทรายจะเกิดการเสียดสีกัน จนกระทั่งเป็นทรายที่มีลักษณะกลมเกลี้ยง ข้อเสียของทรายแม่น้ำคือ ลักษณะกลมเกลี้ยงของทรายแม่น้ำ ทำให้การประสานกับส่วนผสมของปูนซีเมนต์ไม่ดีเท่าที่ควร ทำให้เกิดช่องว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ลักษณะและคุณสมบัติของทราย

ลักษณะที่เรียกว่าทรายดีหรือไม่ ขึ้นอยู่กับความมนของเม็ดทราย ซึ่งความมนนั้นเกิดจากการที่ทรายกระทบกับวัตถุที่ทรายผ่านหรือเกิดการขัดสีในระหว่างเม็ดทราย ถ้าเม็ดทรายมีความมนมาก จะถือว่าเป็นทรายที่ดีเหมาะกับการใช้งาน [32]

3. ชนิดและขนาดของทราย

ในวงการก่อสร้างทั่วไป ทรายที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แสดงดังรูปที่ 2.8 มี 3 ชนิด คือ

1. ทรายหยาบ หรือที่เรียกว่า ทรายราชบุรี เป็นทรายเม็ดใหญ่ มีเหลี่ยม มุม แข็งแรง เหมาะสำหรับใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตที่ต้องการต้านทานกำลังสูง เช่น โครงสร้างสะพาน อาคารที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก ฐานราก เขื่อนกั้นดิน เป็นต้น ทรายชนิดนี้จะมีเปลือกหอยและเศษหินปะปนอยู่ เวลาจะใช้ต้องนำไปร่อนด้วยตะแกรงและทำความสะอาดก่อน

2. ทรายกลาง หรือที่เรียกว่า ทรายอ่างทอง เป็นทรายที่มีขนาดปานกลาง ไม่หยาบและไม่ละเอียดมาก เหมาะสำหรับงานปูนทั่วไป เช่น นำมาเป็นส่วนผสมของปูนก่อสำหรับก่ออิฐ หรือใช้เทพื้นคอนกรีตที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมาก เวลาจะใช้ทรายชนิดนี้จะต้องร่อนเอาเปลือกหอยและสิ่งอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการออกก่อน

3. ทรายละเอียด หรือที่เรียกว่า ทรายอยุธยา เป็นทรายเม็ดละเอียดมาก นำมาใช้กับงานที่ไม่ต้องใช้กำลังมาก เหมาะสำหรับนำมาเป็นส่วนผสมของปูนฉาบผิวหน้า ทำบัว ทำลวดลายต่าง ๆ ก่อนใช้ทรายชนิดนี้จะต้องร่อนทราย เพื่อขจัดสิ่งต่าง ๆ ที่ไม่ต้องการออก [33]

รูปที่ 2.8 ลักษณะของทรายหยาบ ทรายกลาง และทรายละเอียด [34]

การแบ่งชนิดของทรายอาจแบ่งออกได้หลายแบบด้วยกัน เช่น แบ่งตามแหล่งกำเนิดทางเคมี ทางการรวมตัวของแร่ธาตุ ทางธรณีวิทยา ทางภูมิศาสตร์ Holmes และ Boswell ได้แบ่งขนาดของทรายไว้ดังตารางที่ 2.7 และแบ่งโดยทางประโยชน์ดังตารางที่ 2.8 เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 ขนาดของทราย

ขนาดของทราย	ขนาด (mm.)
ใหญ่มาก	2 – 1
ใหญ่	1 – 0.5
กลาง	0.5 - 0.25
เล็ก	0.25 - 0.10

ตารางที่ 2.8 ประโยชน์ของการใช้งานทราย

ประโยชน์ของการใช้งาน	เปอร์เซนต์การใช้งาน (%)
การก่อสร้าง	51
การสร้างทาง	30
การถลุงแร่	7
การทำแก้ว	5
เครื่องจักร	3
ทำกระดาษทราย	0.9
โรยทางรถไฟ	0.7
อื่น ๆ	2.4

2.2.4 การบ่มคอนกรีต

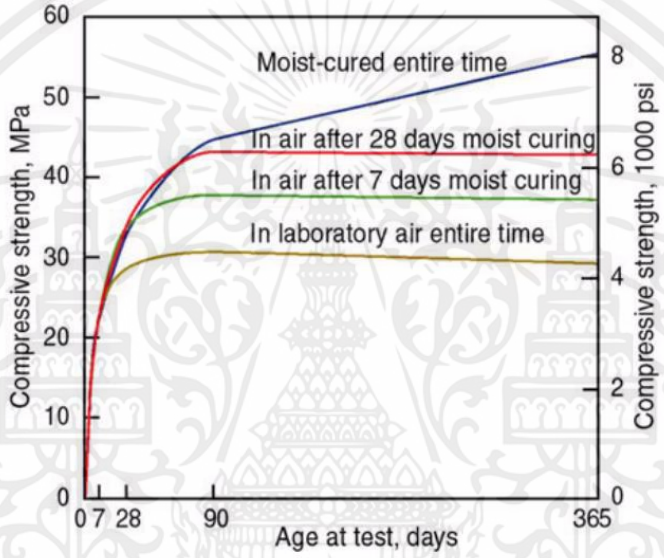
การบ่ม (Curing) คือ ชื่อเฉพาะของวิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง หน้าที่สำคัญของการบ่มคอนกรีต คือ ป้องกันการสูญเสียความชื้นจากเนื้อคอนกรีตและรักษาระดับอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม ดังนั้น วัตถุประสงค์ของการบ่มคอนกรีต คือ เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังและทนทาน ป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีตโดยรักษาระดับอุณหภูมิให้เหมาะสมและลดการระเหยของน้ำให้น้อยที่สุด [35]

การบ่มคอนกรีตที่ไม่ดีพอ จะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตไม่สมบูรณ์ เกิดปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแห้ง ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในกำลังอัดและมีอายุการใช้งานลดลง ถ้ามีน้ำในส่วนผสมมากเกินไป จะทำให้คอนกรีตเกิดช่องว่างในโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์มาก กำลังอัดจะลดลง และถ้าผสมน้ำน้อยเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนกรีตจะใช้น้ำจนแห้งเรียกว่า การแห้งตัว จึงต้องมีการบ่มคอนกรีตเพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและการพัฒนากำลังของคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างเต็มที่ โดยจะเกิดขึ้นเมื่อคอนกรีตก่อตัวและแข็งตัวแล้ว

ในมาตรฐาน ACI 308 ได้กำหนดมาตรฐานในการบ่มน้ำของคอนกรีตอย่างน้อยเป็นเวลา 7 วัน สำหรับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3 ควรบ่มชื้นคอนกรีตอย่างน้อยเป็นเวลา 3 วัน และคอนกรีตประเภทที่ 5 ควรบ่มชื้น อย่างน้อยเป็นเวลา 14 วัน และรูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต [36,37]



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงกำลังอัดของระยะเวลาในการบ่มแต่ละวิธี [39]

การบ่มคอนกรีตคอนกรีตที่อุณหภูมิปกติ แบ่งออกได้ 2 กลุ่ม คือ

1. การเพิ่มความชื้น โดยจะให้ความชื้นต่อผิวหน้าของคอนกรีตโดยตรงในระยะแรกที่คอนกรีตแข็งตัว ซึ่งวิธีนี้ยังสามารถช่วยลดอุณหภูมิที่ผิวของคอนกรีตลงด้วย เหมาะกับคอนกรีตที่เทในอากาศร้อน รายละเอียดการบ่มด้วยวิธีต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 วิธีการบ่มโดยเพิ่มความชื้น

วิธีการบ่ม	ข้อดี	ข้อเสีย
1. การขังน้ำ เหมาะกับงานคอนกรีตที่มีพื้นราบ เช่น แผ่นพื้นทั่วไป ดาดฟ้า พื้นสะพาน วิธีการ ทำโดยใช้ดินเหนียวหรือก่ออิฐทำเป็นคันโดยรอบของงานคอนกรีตที่จะบ่ม ข้อควรระวัง น้ำที่ใช้บ่มไม่ควรมีอุณหภูมิต่ำกว่า คอนกรีตเกิน 10˚C	— ทำได้สะดวก ง่าย ราคาถูก — วัสดุหาได้ง่าย เช่น ดินเหนียวและน้ำ — ซ่อมแซมได้สะดวก รวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่าย	— ต้องหมั่นตรวจดูรอยร้าวของดินเหนียวที่นำมาใช้อยู่เสมอ เพราะน้ำอาจซึมได้ — ต้องเก็บทำความสะอาดบริเวณคอนกรีตที่บ่มเมื่อเสร็จงานบ่มเรียบร้อยแล้ว
2.การฉีดน้ำหรือพรมน้ำ วิธีการ ใช้ได้ทั้งแนวราบและแนวดิ่ง เช่น ผนัง กำแพง และพื้น	— ทำได้สะดวก ได้ผลดี — ค่าใช้จ่ายถูก — ไม่ต้องดูแลตลอดเวลา	— ไม่เหมาะสมกับสถานที่ที่หาน้ำได้ยาก — ไม่สะดวกกับการฉีดกับกำแพงในแนวดิ่ง เพราะน้ำจะแห้งเร็ว
3.การใช้วัสดุเปียกชื้นคลุม วิธีการ นำผ้าใบ กระสอบที่อุ้มน้ำได้ ถ้าเป็นผ้าใบควรเป็นสีขาว เพราะสะท้อนความร้อนได้ดี รอยต่อต้องเหลื่อมกันให้มาก ถ้าใช้ฟางหรือขี้เลื่อยคลุมควรหนาไม่น้อยกว่า 15 ซม. คลุมให้ทั่วและฉีดน้ำให้ชุ่มอยู่เสมอ	— ได้ผลดีมาก ราคาไม่สูงเกินกว่าที่จะทำ — ทำได้ทั้งแนวราบและแนวดิ่ง (กรณีใช้ผ้าและกระสอบ) — หาวัสดุมาใช้ได้ง่าย	— ถ้าอากาศร้อนจะแห้งเร็ว — ถ้าที่กว้าง ๆ ใช้ผ้าใบคลุมจะเสียค่าใช้จ่ายมาก — ต้องฉีดน้ำให้ชุ่มอยู่เสมอ — ต้องพิจารณากอนที่จะนำมาใช้ว่าเป็นอันตรายต่อปูนซีเมนต์หรือผิวคอนกรีตหรือไม่

2. วิธีการป้องกันการเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต

เป็นการป้องกันความชื้นจากผิวคอนกรีตไม่ให้ออกสู่ภายนอก การป้องกันความชื้น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.10 วิธีป้องกันการเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต

วิธีการบ่ม	ข้อดี	ข้อเสีย
1.การใช้กระดาษกันน้ำซึมได้ กระดาษนี้ทำด้วยกระดาษเหนียว ยึดติดกันด้วยกาวยางมะตอยและเสริมความเหนียวด้วยใยแก้ว	— ทำได้สะดวก รวดเร็ว — ป้องกันคอนกรีตไม่ใช้แห้งเร็ว แต่ต้องคอยราดน้ำไว้	— ราคาแพง — ไม่สะดวกในการปฏิบัติงาน — ไม่สะดวกในการเก็บรักษาต่อไป หากนำมาใช้งานต่อ
2.การใช้แผ่นพลาสติกคลุม เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา และสามารถใช้คลุมงานคอนกรีตที่จะบ่มได้ทันทีที่ต้องการ	— มีน้ำหนักเบา ปฏิบัติงานได้ง่าย — ได้ผลดีในการป้องกันน้ำระเหยออกจากคอนกรีต — ไม่ต้องราดน้ำให้ชุ่มอยู่ภายใน	— บางมาก ชำรุดง่าย — ต้องหาของหนักทับไว้กันปลิว — ราคาแพง ถ้าใช้ในการคลุมงานคอนกรีตที่กว้าง ๆ
3.การบ่มด้วยน้ำยาเคมีเคลือบผิวคอนกรีต มีหลายสีด้วยกัน เช่น ใส ขาว เทาอ่อน และดำ สำหรับสีขาวจะเหมาะสมกว่า เพราะจะสะท้อนความร้อนรวมถึงแรงได้ดีกว่า โดยการใช้พ่นคลุมพื้นผิวคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็ว ๆ เช่น ลานบินหลังคากว้าง ๆ งานพิเศษต่าง ๆ หรือตึก สูง ๆ ที่น้ำส่งไปได้ลำบาก	— สะดวก รวดเร็ว — ได้ผลดีพอสมควร ถ้าน้ำยานั้นเป็นของแท้และมีความเข้มข้นตามมาตราฐานของผู้ผลิต — ไม่ต้องคอยรดน้ำ — ไว้ใช้ในกรณีที่การบ่มด้วยวิธีอื่นไม่ได้ผล	— ค่าใช้จ่ายสูง — ต้องจัดเตรียมเครื่องมือสำหรับพ่นทุกครั้ง — ต้องใช้บุคลากรที่เคยทำมาก่อนมาพ่น — น้ำยาเคมีที่ใช้พ่นอาจทำอันตรายแก่ผู้ที่อยู่ในระยะใกล้เคียงได้
4.การบ่มโดยใช้ไม้แบบ ต้องพ่นไม้แบบให้มีความชื้นอยู่เสมอ ไม้แบบจะป้องกันการเสียความชื้นได้ดีมาก ฉะนั้นควรรักษาไม้แบบไว้ให้นานที่สุดหลังจากถอดแบบแล้วจึงใช้วิธีอื่นต่อ	— ทำได้สะดวก	— ต้องใช้ไม้แบบจำนวนมาก — ช้า เพราะต้องนำไม้แบบไปใช้งานอื่นต่อไป — ถ้าเป็นไม้แบบเก่า ต้องเสียเวลาทำความสะอาดไม้แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เพอร์ไลท์

เพอร์ไลท์ (Perlite) ในความหมายที่ทราบกันโดยทั่วไป หมายถึงหินภูเขาไฟเนื้อแก้วทุกชนิด เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมในเวลาที่รวดเร็วจะขยายตัว มีน้ำหนักเบา และมีความพรุนสูง หินเพอร์ไลท์ ได้แก่ หินภูเขาไฟเนื้อแก้ว ที่มีลักษณะรอยแตกเป็นวง ๆ ซ้อนกันคล้ายกลีบหัวหอม และเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมในเวลาที่รวดเร็ว จะขยายตัวออกไปได้ ตั้งแต่ 4-20 เท่าของปริมาตรเดิมทำให้เปลี่ยนสภาพเป็นสารที่มีน้ำหนักเบา มีความพรุนสูง และมีลักษณะคล้ายหินพัมมิส สารที่ได้จากการขยายตัวของหินเพอร์ไลท์นี้ เรียกว่า เพอร์ไลท์

รูปที่ 2.10 เพอร์ไลท์ที่ผ่านกระบวนการเผาและขยายตัว [38]

2.3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์

หินเพอร์ไลต์ส่วนใหญ่เนื้อหินมีลักษณะเป็นแก้วมักจะมีรอยแตกเป็นวง ๆ ซ้อนกันคล้ายกลีบหัวหอม รอยแตกนี้อาจจะมองเห็นด้วยตาหรืออาจจะต้องอาศัยดูด้วยแว่นขยายหรือใช้กล้องจุลทรรศน์ โดยทั่วไปจะมีสีเทาอ่อน แต่อาจจะพบสีดำหรือสีน้ำตาลได้ ในเนื้อหินมักจะมีผลึกแร่ต่าง ๆ และมีชิ้นส่วนของเศษหินชนิดอื่นฝังตัวอยู่ โดยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของหินเพอร์ไลต์ มีดังนี้ [39]

1. ความแข็งตามมาตรฐานของโมห์ (Mohs' scale) ระหว่าง 5.5-7.0
2. ความถ่วงจำเพาะ 2.3-2.8
3. จุดหลอมตัว 760-1,300 องศาเซลเซียส
4. ค่าดัชนีหักเหแสง 1.490-1.610

2.3.2 คุณสมบัติทางเคมี

หินเพอร์ไลท์เป็นหินที่มีส่วนประกอบของออกไซด์ของธาตุซิลิกาค่อนข้างสูงประมาณร้อยละ 70 ดังตารางที่ 2.11 และมีน้ำเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 2-5 ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารเคมีอื่น ๆ จัดอยู่ในจำพวกสารเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 สารประกอบออกไซด์ของเพอร์ไลท์

สารประกอบออกไซด์	% โดยน้ำหนัก
SiO_2	72.48
Al_2O_3	13.15
Fe_2O_3	1.23
TiO_2	0.15
CaO	1.13
MgO	0.35
K_2O	4.21
Na_2O	3.56

เพอร์ไลท์แปรรูปที่เราเห็นโดยพื้นฐานแล้ว คือ “ข้าวโพดคั่วภูเขาไฟ” เนื่องจากแร่เพอร์ไลท์จะขยายตัวเมื่อถูกความร้อนที่อุณหภูมิสูงมากเช่นเดียวกับข้าวโพดคั่ว ดังนั้น ลูกบอลเพอร์ไลท์ที่ผ่านการแปรรูปจึงถูกสร้างขึ้นโดยการบดแก้วเพอร์ไลท์ธรรมชาติ แล้วนำไปอบในเตาอบอุตสาหกรรมเพื่อให้การเปลี่ยนแปลงเสร็จสมบูรณ์ เพอร์ไลท์ที่บดแล้วจะต้องได้รับความร้อนอย่างรวดเร็วถึง 900 องศาเซลเซียส (ประมาณ 1,650 องศาฟาเรนไฮต์) เพื่อให้โครงสร้างแร่อ่อนตัวลงด้วยความร้อน ทำให้น้ำที่ขังอยู่ภายในขยายตัวเป็นไอน้ำเพื่อหลบหนี กระบวนการนี้นำไปสู่การขยายตัวของเศษแร่ที่บดแล้ว โดยปกติเพอร์ไลท์จะขยายตัวระหว่าง 7 ถึง 16 เท่าของขนาดและปริมาตรเดิม และมีลักษณะคล้ายลูกบอลโฟมเทียมที่มีน้ำหนักเบา มีรูพรุนจำนวนมากอยู่ภายในโดยทั่วไปจะมีความเสถียร สามารถยึดรูปร่างได้ง่ายในดินโดยไม่พังทลาย [40]

2.3.3 การใช้ประโยชน์

การนำเพอร์ไลท์ไปใช้ให้เป็นประโยชน์ สามารถทำได้หลายอย่าง ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของเพอร์ไลท์ ส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในงานด้านก่อสร้าง เพื่อประโยชน์ในการลดน้ำหนักของสิ่งก่อสร้าง และยังช่วยเป็นฉนวนป้องกัน ความร้อน ความเย็น และป้องกันเสียงได้ นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ ตลอดจนงานทางด้านเกษตร และงานด้านอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น

<u>1. ด้านอุตสาหกรรมก่อสร้าง</u>

มีการนำเพอร์ไลท์มาใช้ในด้านอุตสาหกรรมก่อสร้างประมาณร้อยละ 70 ของปริมาณที่ผลิตได้ทั้งโลก เนื่องจากคุณสมบัติที่น้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ มีความพรุนสูง และทนไฟ ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวเพอร์ไลท์จึงนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฝ้าเพดาน อัตราการใช้ฝ้าเพดานที่เพิ่มขึ้นทำให้ตลาดขยายตัว เนื่องจากเพอร์ไลท์เป็นส่วนประกอบของฝ้าและเพดาน และผลิตภัณฑ์ยิปซัมแผ่นเรียบบางชนิด เพอร์ไลท์เป็นส่วนผสมที่กระเบื้องไม่เป็นตัวนำความร้อน คลื่นเสียงทะลุผ่านไม่ได้ มีความหนาแน่นต่ำ และเป็นวัสดุทนไฟ เมื่อนำไปผสมกับปูนซีเมนต์ ทำให้ได้คุณภาพที่ดีกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา เมื่อนำไปฉาบผนังตึกและเพดานจะทำให้ปูนสามารถยึดติดผนังได้ดี แห้งเร็ว และไม่เกิดรอยร้าว เนื่องจากมีความยืดหยุ่นได้ดีและยังเป็นฉนวนป้องกันความร้อนอีกด้วย

นอกจากนี้เมื่อนำเพอร์ไลท์ไปผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในการทำคอนกรีตใช้ในงานก่อสร้างต่าง ๆ จะทำให้ลดน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างนั้นลงได้ และยังทำหน้าที่เป็นตัวฉนวนป้องกันความร้อนและป้องกันการสะท้อนของเสียงได้เป็นอย่างดี คอนกรีตที่ใช้เพอร์ไลท์ผสมจะมีความหนาแน่นต่ำถึง 320 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และถ้ามีความหนาประมาณ 2 นิ้ว จะมีประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนได้เท่ากับแผ่นฉนวนมาตรฐาน แต่มีความแข็งแรงและคงทนกว่าแผ่นฉนวนมาตรฐานมาก ได้มีการทดลองและเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยเพอร์ไลท์กับปูนซีเมนต์ผสมแบบธรรมดา

จากเหตุผลข้างต้น ได้มีการนำเพอร์ไลท์ไปใช้ในงานด้านก่อสร้างกันมาก เช่น ใช้ทำคอนกรีตบนชั้นดาดฟ้าหรือทำหลังคาทำพื้นชั้นต่าง ๆ ของตึกที่มีความสูงมาก ๆ และยังใช้ผสมปูนฉาบผนังตึก เนื่องจากเมื่อใช้คอนกรีตที่ผสมเพอร์ไลท์จะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการทำฐานรากของตึก (Foundation) และจะช่วยประหยัดเหล็กเส้นที่จะใช้ทำโครงสร้างได้อีกทาง นอกจากนี้แล้วยังจะช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่จะนำไปใช้กับเครื่องปรับอากาศภายในตึกที่สร้างด้วยคอนกรีตผสมเพอร์ไลท์ เพราะเป็นฉนวนป้องกันความร้อนในตัวเองอยู่แล้ว จะเห็นได้ว่าเพอร์ไลท์นั้นมีประโยชน์อย่างมากมายต่อสิ่งก่อสร้างสำหรับประเทศไทยซึ่งตั้งอยู่ในบริเวณที่มีอากาศร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปใช้ในการก่อสร้างตึกสูง ๆ ในกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีปัญหาเกี่ยวกับการอ่อนตัวของพื้นดินและยังจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการทำฐานรากของตึกได้มาก

2. เป็นฉนวน

ห้องที่ต้องการรักษาอุณหภูมิทั้งความเย็นหรือความร้อนเป็นพิเศษ ได้มีการใช้เพอร์ไลท์อัดเข้าไปในช่องว่างระหว่างผนังของห้อง ซึ่งมักจะใช้เพอร์ไลท์ที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า 64 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เช่น ห้องที่ใช้เก็บเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่ต้องการอุณหภูมิภายในห้องต่ำ สำหรับโรงงานถลุงโลหะนั้น ได้มีการใช้เพอร์ไลท์เป็นฉนวนเพื่อต้องการกักเก็บความร้อนไว้ นอกจากนี้ยังใช้เพอร์ไลท์เป็นตัวรองรับแท่งเหล็กร้อนที่ได้จากการหลอมในการเคลื่อนย้าย

3. เป็นเครื่องกรอง

เนื่องจากเพอร์ไลท์มีปริมาณออกไซด์ของธาตุซิลิกาสูง อาจมีมากกว่าร้อยละ 70 มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซึมที่ดีและยังเป็นสารเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมีในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ จากคุณสมบัติดังกล่าวสามารถนำเพอร์ไลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปใช้เป็นตัวกรองและตัวดูดซึมที่ดี เช่น การใช้เพอร์ไลท์ในการเป็นเครื่องกรองน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ใช้กรองน้ำผลไม้ในโรงงานผลิตน้ำผลไม้และในโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลทรายได้มีการใช้เพอร์ไลท์มากรองน้ำตาลให้สะอาด เป็นต้น นอกจากนั้นยังมีการนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมด้านเคมีและโรงงานผลิตยารักษาโรค

4. ด้านการเกษตร

ในการรักษาและปรับสภาพของดินที่ใช้ในการเกษตรมีการใช้เพอร์ไลท์ผสมลงไปในดิน เพราะเพอร์ไลท์มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซึมที่ดี และมีความพรุนในตัวสูงทำให้สภาพดินเป็นดินร่วนและเพอร์ไลท์ยังสามารถช่วยรักษาความสมดุลระหว่างปริมาณของน้ำและอากาศในดินได้ด้วย

จากผลการทดลองด้านเกษตรของบริษัทผลิตเพอร์ไลท์ในประเทศญี่ปุ่น พบว่าเมื่อผสมเพอร์ไลท์ลงในดินจะมีคุณสมบัติดังนี้

1. ความพรุนของเพอร์ไลท์มีมากกว่าดินเหนียวกว่า 5 เท่า ทำให้มีปริมาณของก๊าซออกซิเจนในดินเหนียวพอต่อความต้องการของพืช

2. สามารถกักเก็บความชื้นไว้ได้ดีกว่าดินทรายถึง 4 เท่า ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้ดินแห้งจนเกินไป

3. ทำให้รักษาความสมดุลระหว่างปริมาณน้ำและอากาศในดิน และทำให้ดินไม่ชื้นหรือแห้งจนเกินไป

4. ทำให้ดินมีความยุ่ย ไม่จับตัวกันแข็ง

5. คุณสมบัติความเป็นฉนวน จะช่วยรักษาอุณหภูมิของดินไม่ให้เปลี่ยนแปลงมาก

6. ช่วยรากพืชในการดูดซึมอาหาร

7. เนื่องจากมีสภาพเป็นกลาง มีความคงทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี สามารถผสมกับปุ๋ยเคมีทุกชนิดได้

8. เพอร์ไลท์จัดเป็นพวกสารอนินทรีย์ เมื่อผสมลงในดินจะมีความคงทนและไม่ผุสลายจากจุลินทรีย์

นอกจากนี้เพอร์ไลท์ยังช่วยดูดซึมสะสมพวกยาฆ่าแมลง ยากำจัดวัชพืชและปุ๋ยเคมีต่าง ๆ ที่เกษตรกรเติมลงในดินไว้ไม่ให้ซึมหายออกไปจากดินเร็วเกินไป ทั้งยังช่วยลดความเข้มข้นของปุ๋ยและยาฆ่าแมลงที่เติมลงในดิน จากคุณสมบัติต่าง ๆ ของเพอร์ไลท์ดังกล่าวข้างต้น ช่วยเพิ่มผลผลิตทางด้านเกษตรกรรมของประเทศชาติอย่างมาก เพราะการเกษตรกรรมเป็นอาชีพหลักของประเทศ และยังสามารถนำไปปรับปรุงบริเวณที่สภาพดินเสื่อม เช่น ดินที่มีความพรุนต่ำไม่สามารถอุ้มน้ำได้ดี

5. ด้านอื่น ๆ

นอกจากที่กล่าวมาแล้ว เพอร์ไลท์ยังสามารถนำไปผสมกับสีทาได้ทั้งภายในและภายนอกอาคารบ้านเรือน มีการนำเพอร์ไลท์ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ใช้เป็นผงขัด และผสมซีเมนต์ใช้ในการฉาบผนังบ่อน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 แหล่งผลิตเพอร์ไลท์ของประเทศไทย

แหล่งเพอร์ไลท์พบอยู่ในบริเวณกลุ่มหินภูเขาไฟตอนกลางของประเทศ ซึ่งจัดอยู่ในหน่วยหินภูเขาไฟลำนารายณ์ หน่วยหินภูเขาไฟลำนารายณ์นี้คลุมพื้นที่ประมาณ 1,200 ตารางกิโลเมตร อยู่ในเขตจังหวัดลพบุรีและจังหวัดเพชรบูรณ์ อยู่ห่างจากกรุงเทพมหานครไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือประมาณ 200 กิโลเมตร หน่วยหินภูเขาไฟลำนารายณ์ประกอบด้วยหินภูเขาไฟชนิดต่าง ๆ ตั้งแต่บะซอลต์ แอนดีไซต์ ไปจนถึงไรโอไลต์

เพอร์ไลท์เกิดร่วมกับไรโอไลต์และหินเถ้าถ่านภูเขาไฟ (Ash-flow tuffs) โดยเกิดลักษณะแบบลาวาและเกิดแบบผนังโผลให้เห็นเป็นชั้นหนาตามบริเวณของภูเขาไฟลำนารายณ์โดยเฉพาะขอบด้านตะวันตก เพอร์ไลท์ที่พบมีสีดำ น้ำตาล เขียวเข้ม-อ่อน มีลักษณะเนื้อเป็นแก้วและมีผลึกของเฟลด์สปาร์ประมาณ 2-10 เปอร์เซ็นต์และผลึกของไบโอไทต์ประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์ ชั้นของเพอร์ไลท์ที่โผล่มีความหนาตั้งแต่ 1-20 เมตร วางตัวค่อนข้างราบ ส่วนมากจะวางตัวอยู่บนหินเถ้าถ่านภูเขาไฟ และถูกปิดทับด้วยไรโอไลต์ [41]

2.4 เส้นใยแก้วทนด่างอัลคาไลน์

ใยแก้วทนด่างอัลคาไลน์ (AR glass fiber) ถูกนำมาใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตและมอร์ตาร์มาเพื่อใช้เสริมความแข็งแรงให้กับคอนกรีต ช่วยให้โครงสร้างมีความทนทานและใช้งานได้ยาวนาน เส้นใยแก้วมีเซอร์โคเนียเป็นส่วนประกอบ แสดงดังตารางที่ 2.12 ทำให้มีความต้านทานแรงดึงและโมดูลัสสูง ข้อดีของเส้นใยแก้ว AR คือทนต่อการเกิดสนิม ซึ่งต่างจากเหล็ก [42]

รูปที่ 2.11 เส้นใยแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.12 ข้อมูลจำเพาะของแร่ใยแก้วทนด่างอัลคาไลน์ [43]

ลักษณะ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน
เส้นผ่านศูนย์กลาง	μm	12.7 ─ 17.3
ความยาว	mm	22.5 ─ 25.5
ความชื้น	%	<= 0.2
ค่าโมดูลัส	GPa	71.0 ─ 80.0
ความถ่วงจำเพาะ	-	2.6 ─ 2.8
ZrO_2	%	16.3 ─ 17.3
TiO_2	%	5.0 ─ 6.0

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาอัตราส่วนของงานวิจัย ศักดิ์สิทธิ์ [44] ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุผสม ได้อัตราส่วนผสมของคอนกรีตแบ่งตามการใช้งานประเภทต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 2.13 และจึงเลือกใช้อัตราส่วน 1 : 2 : 4 ต่อมาศึกษาอัตราส่วนของเพอร์ไลท์ของงานวิจัย Patthanavarit et al. [45] ได้มีการนำเพอร์ไลท์เข้าเป็นส่วนผสมเพิ่มเติมในคอนกรีตคอมโพสิต ซึ่งปริมาณของเพอร์ไลท์ที่นำมาเป็นส่วนผสมอยู่ระหว่าง 0-15% โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่าปริมาณของเพอร์ไลท์ที่เปลี่ยนแปลงส่งผลต่อทั้งความแข็งแรง ความหนาแน่น และปริมาณการดูดซึมน้ำอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ปริมาณเพอร์ไลท์มากขึ้นจะช่วยลดน้ำหนักของคอนกรีตลง แต่ในทางกลับกันความแข็งแรงของคอนกรีตจะลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Akyuncu และ liturk [46] ที่พบว่าการเติมวัสดุเพอร์ไลท์มากกว่า 20% โดยน้ำหนักจะส่งผลให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลงอย่างชัดเจน แต่จะได้ความเป็นฉนวนความร้อนของคอนกรีตที่ดีขึ้น ในงานวิจัยของ Cheng et al. [47] ได้ทำซีเมนต์เสริมใยแก้วเพื่อลดน้ำหนักของคอนกรีตและเพิ่มความแข็งแรงให้กับคอนกรีต ซึ่งปริมาณเส้นใยแก้วที่นำมาผสมมีค่าระหว่าง 0-36% โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อมีปริมาณของเส้นใยแก้วมากกว่า 2.4% จะทำให้คอนกรีตเกิดการแตกหักได้ง่ายกว่า หมายความว่ายิ่งมีปริมาณของเส้นใยมาก จะทำให้คอนกรีตแตกหักได้ง่ายมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.13 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตแบ่งตามการใช้งานประเภทต่าง ๆ

อัตราส่วนผสมของคอนกรีตโดยปริมาตร	ประเภทของงาน
1 : 1.5 : 4	เสาและส่วนของโครงสร้างอาคารที่ต้องการทึบน้ำ
1 : 2 : 4	งานคอนกรีต เสริมเหล็กทั่วไป
1 : 2.5 : 4	งานถนน ทางเท้า ฐานรากอาคาร เขื่อนกั้นดิน
1 : 3 : 4	งานคอนกรีตขนาดใหญ่ เช่น ฐานรากขนาดใหญ่ หรือผนังที่หนา

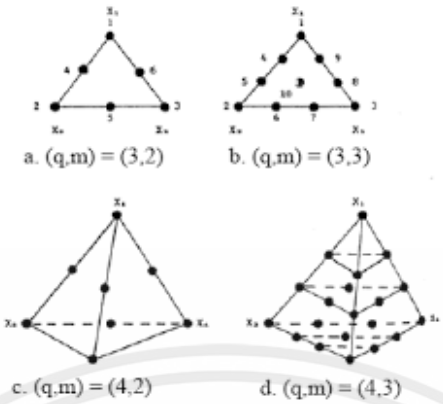
2.6 การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture design)

Mixture design เป็นการออกแบบการทดลองเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของปัจจัยเชิงปริมาณตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป มีวัตถุประสงค์คือสำรวจผลตอบเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของแต่ละส่วนประกอบที่จะทำให้ผลลัพธ์มีค่าที่ดีที่สุดหรือเป็นไปตามที่ผู้ทดลองต้องการโดยยึดหลักว่าผลรวมปริมาณของปัจจัยทั้งหมดจะต้องเป็น 1.0 หรือ (100%) เสมอ กล่าวคือเมื่อมีปัจจัยหนึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้น ปัจจัยอื่น ๆ ที่เหลือย่อมมีสัดส่วนลดลง ซึ่งแตกต่างจากการทดลองที่ไม่ใช่แบบผสม (Mixture) ที่ตัวแปรแต่ละตัวเป็นอิสระจากกัน [48] โดยการออกแบบส่วนผสมมีแบบแผนการออกแบบย่อยแบ่งได้ 4 แบบ ดังนี้

2.6.1 การออกแบบแบบเชฟเฟ่ซิมเพล็กซ์แล็คทิส (Scheffe' simplex-lacttice)

เป็นการออกแบบโครงตาข่ายอย่างง่าย เพื่ออำนวยความสะดวกในการเลือกส่วนผสมให้กับผู้ทดลอง โดยเลือกมาจากส่วนผสมทั้งหมดที่เป็นไปได้จริง ซึ่งมีจำนวนนับไม่ถ้วน สามารถใช้ได้กับส่วนประกอบที่มีตั้งแต่ 2-30 องค์ประกอบ โดยมีองศา (degree) m ประกอบด้วย m+1 จุดของค่าที่เว้นระยะเท่ากันระหว่าง 0 ถึง 1 สำหรับแต่ละส่วนประกอบ เช่น ถ้า m=2 เศษส่วนที่เป็นไปได้คือ 0 1/2 และ 1 สำหรับ m=3 ค่าที่เป็นไปได้คือ 0 1/3 2/3 และ 1 [49]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 การออกแบบแบบเชฟเฟ่ซิมเพล็กซ์แล็คทิส (Scheffe’ simplex-lacttice)

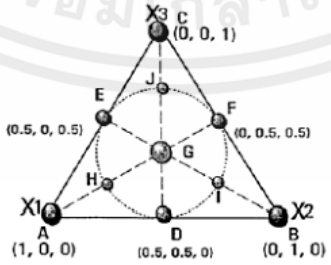
2.6.2 การออกแบบแบบเชฟเฟ่ซิมเพล็กซ์เซนทรอยด์ (Scheffe’ simplex-centroid)

เป็นการออกแบบการทดลองที่มีสิ่งทดลองเท่ากับแต่ละปัจจัยมีสัดส่วนที่เท่ากันทุกปัจจัย

รูปที่ 2.13 การออกแบบแบบเชฟเฟ่ซิมเพล็กซ์เซนทรอยด์ (Scheffe’ simplex-centroid)

2.6.3 การออกแบบแบบซิมเพล็กซ์แอคเซียล (Simplex-axial)

เป็นการออกแบบการทดลอง โดยเน้นจุดที่เป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ของปัจจัย



รูปที่ 2.14 การออกแบบแบบซิมเพล็กซ์แอคเซียล (Simplex-axial)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.4 การออกแบบแบบเอ็กซ์ทรีมเวอร์ทิส (Extreme vertices)

เป็นการออกแบบการทดลองแบบที่มีข้อจำกัดสัดส่วน (Design with constraints on proportion) หรือแบบที่มีข้อจำกัด (Constrained mixture design) กล่าวคือ ระดับในแต่ละปัจจัยไม่จำเป็นต้องเป็น 0-100% โดยอาจเป็น 30-40% (0.30-0.40) หรือ 15-25% (0.15-0.25) เป็นต้น สาเหตุเนื่องจากความจำเป็น โดยพื้นฐานในการทดสอบบางอย่าง จะใช้เมื่อมีการนำเสนอทั้งข้อจำกัดขอบเขตล่างและขอบเขตบนของส่วนประกอบ หรือเมื่อมีการเพิ่มข้อจำกัดเชิงเส้นลงในหลายองค์ประกอบ [50]

2.7 แบบจำลองการถดถอย (Regression model)

แบบจำลองการถดถอย (Regression model) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย เพื่อนำไปสร้างสมการทำนายค่าของผลตอบ ซึ่งจะทำให้สามารถหาผลตอบที่จุดใด ๆ ในแต่ละช่วงของปัจจัยได้ โดยวิธีการที่ใช้ในการประมาณค่าตัวแปรต่าง ๆ ในแบบจำลองนี้ส่วนใหญ่คือวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least square method) ซึ่งเป็นการประมาณค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (β) เพื่อทำให้ผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาด (2ε) มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งบางครั้งเราเรียก β เหล่านี้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย โดยมีขั้นตอนในการประมาณค่าดังนี้

1. สร้างผลรวมของกำลังสองของค่าความผิดพลาด โดยการกำหนดผลตอบ
2. ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยในเทอมต่าง ๆ ที่ทำให้ผลรวมของกำลังสองของค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด
3. นำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้ไปเขียนสมการทำนายค่าของผลตอบ

2.7.1 แบบจำลองการถดถอยสำหรับการทดลองส่วนผสม (Mixture design)

เนื่องจากตัวแปรทุกตัวรวมกันได้ 1 หรือ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยสำหรับการทดลองส่วนผสม (Mixture design) จึงไม่มีค่าคงที่หรือเทอม β_0 และ $\beta_{ij}X_1^2$ โดยแบบจำลองที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีดังนี้

1. รูปแบบสมการเชิงเส้น (Linear model)

$$E(y) = \sum_{i=1}^{p} \beta_i X_i \qquad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. รูปแบบสมการกำลังสอง (Quadratic model)

$$E(y) = \sum_{i=1}^{p} \beta_i X_i + \sum \sum_{i<j}^{p} \beta_{ij} X_i X_j \quad (2.2)$$

3. รูปแบบสมการกำลังสามแบบพิเศษ (Special cubic model)

$$E(y) = \sum_{i=1}^{p} \beta_i X_i + \sum \sum_{i<j}^{p} \beta_{ij} X_i X_j + \sum \sum_{i<j<k}^{p} \sum \beta_{ijk} X_i X_j X_k \quad (2.3)$$

4. รูปแบบสมการกำลังสามทั้งหมด (Full cubic model) [51]

$$E(y) = \sum_{i=1}^{p} \beta_i X_i + \sum \sum_{i<j}^{p} \beta_{ij} X_i X_j + \sum \sum_{i<pj}^{p} \delta_{ij} X_i X_j (X_i - X_j) + \sum \sum_{i<j<k}^{p} \sum \beta_{ijk} X_i X_j X_k \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในการจัดทำปริญญานิพนธ์หัวข้อเรื่อง การพัฒนาคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์ จากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ จะออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีแบบเอ็กซ์ทรีมเวอร์ทิส (Extreme vertices) ในการออกแบบส่วนผสม ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงาน โดยมีรายละเอียดเนื้อหาดังนี้

3.1 การออกแบบการทดลอง

3.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน

3.3 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ

3.4 การวิเคราะห์ผลสมบัติต่าง ๆ ผ่านโปรแกรม Minitab

3.5 การเปรียบเทียบผลลัพธ์

3.1 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีเอ็กซ์ทรีม เวอร์ทิส (Extreme vertices) ต้องมีการจำกัดสัดส่วนของปัจจัย โดยจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า อัตราส่วนของการผสมคอนกรีต จะใช้ปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์อยู่ในช่วง 30-50% โดยน้ำหนักและปริมาณทรายอยู่ในช่วง 40-60% โดยน้ำหนัก [52] ปริมาณของเพอร์ไลท์อยู่ในช่วง 5-15% โดยน้ำหนักและปริมาณของเส้นใยแก้วอัลคาไลน์อยู่ในช่วง 0-5% โดยน้ำหนัก จากปริมาณของส่วนผสมของคอนกรีตที่ได้กล่าวมา ในงานวิจัยนี้จึงได้กำหนดปริมาณของปัจจัยต่าง ๆ โดยคอนกรีตถูกกำหนดไว้ระหว่าง 35-40% โดยน้ำหนัก ทรายอยู่ระหว่าง 50-60% โดยน้ำหนัก เพอร์ไลท์อยู่ระหว่าง 5-15% โดยน้ำหนัก และเส้นใยอัลคาไลน์อยู่ระหว่าง 0-3% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงการจำกัดสัดส่วนของปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติ	ค่าต่ำสุด (%)	ค่าสูงสุด (%)
น้ำต่อปูนซีเมนต์	35.00	40.00
ทราย	50.00	60.00
เพอร์ไลท์	5.00	15.00
เส้นใยแก้วอัลคาไลน์	0.00	3.00

หลังจากที่ได้ขอบเขตของส่วนผสมแล้ว นำอัตราส่วนที่ได้ไปออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab ทำให้ได้สูตรผสมทั้งหมด 17 สูตร ซึ่งมีปริมาณส่วนผสมที่แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงส่วนผสมของคอนกรีตคอมโพสิตที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้

สูตรที่	ปูนซีเมนต์ต่อน้ำ (%)	ทราย (%)	เพอร์ไลท์ (%)	เส้นใยแก้วอัลคาไลน์ (%)
1	37.50	53.00	8.00	1.50
2	36.25	55.00	6.50	2.25
3	35.00	50.00	12.00	3.00
4	38.75	54.00	6.50	0.75
5	38.75	51.50	9.00	0.75
6	38.75	52.50	6.50	2.25
7	38.75	51.50	7.50	2.25
8	40.00	52.00	5.00	3.00
9	35.00	57.00	5.00	3.00
10	36.25	51.50	10.00	2.25
11	40.00	55.00	5.00	0.00
12	40.00	50.00	7.00	3.00
13	36.25	51.50	11.50	0.75
14	35.00	60.00	5.00	0.00
15	35.00	50.00	15.00	0.00
16	40.00	50.00	10.00	0.00
17	36.25	56.50	6.50	0.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงาน

ในขั้นตอนแรกจะทำการเตรียมอุปกรณ์และส่วนผสมทั้งหมดที่ต้องนำมาผสม หลังจากนั้นจึงทำการกรองส่วนผสมเพื่อให้อนุภาคมีขนาดเท่ากันโดยปูนซีเมนต์และเพอร์ไลท์ใช้ตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 35 แสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 ทรายใช้ตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 16 แสดงดังรูปที่ 3.3 เส้นใยแก้วและน้ำจัดเตรียมก่อนที่จะนำมาตวง แสดงดังรูปที่ 3.4 และ 3.5

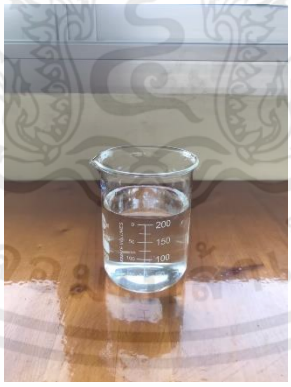
รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์

รูปที่ 3.2 เพอร์ไลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 ทราย

รูปที่ 3.4 เส้นใยแก้วอัลคาไลน์



รูปที่ 3.5 น้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนต่อมา ตวงและชั่งส่วนผสมทั้งหมดให้ได้ปริมาณตามสูตรทั้ง 17 สูตรที่คำนวณมาจากโปรแกรม Minitab แสดงดังรูปที่ 3.6

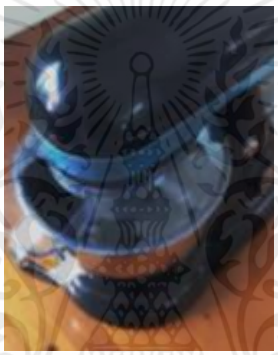
รูปที่ 3.6 การตวงและชั่งส่วนผสม

หลังจากนั้นเทส่วนผสมทีละอย่างลงในชามผสม และทำการผสมให้เข้ากันโดยใช้ไม้พาย แสดงดังรูปที่ 3.7 ขณะผสมควรเทน้ำลงในชามผสมทีละเล็กน้อยเพื่อไม่ให้ส่วนผสมจับตัวกันเป็นก้อน จากนั้นนำส่วนผสมเทลงในเครื่องผสม และให้เครื่องทำงานเป็นเวลาประมาณ 1 นาทีเป็นอย่างน้อย เพื่อให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.8 และ 3.9

รูปที่ 3.7 การผสมส่วนผสมให้เข้ากัน

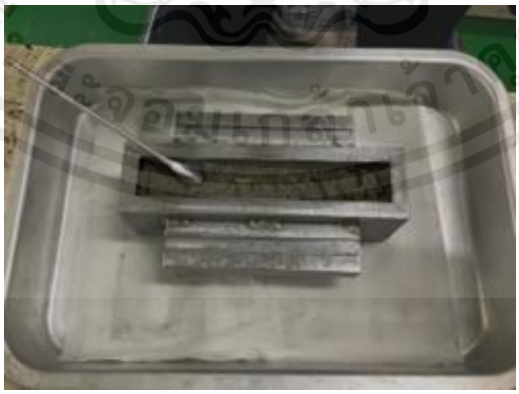
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.8 การผสมน้ำลงในส่วนผสม



รูปที่ 3.9 การใช้เครื่องผสมผสมส่วนผสม

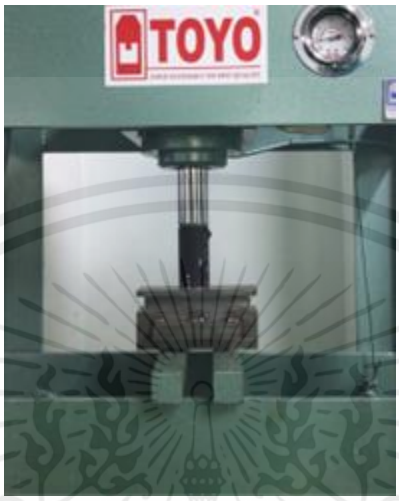
เมื่อทำการผสมเสร็จ นำส่วนผสมที่ได้ค่อยๆบรรจุลงในแม่พิมพ์ ครั้งละประมาณ 130 กรัมในการอัดขึ้นรูป 1 ชิ้นงาน ซึ่ง 1 สูตรการทดลองจะได้ชิ้นงานประมาณ 7 – 8 ก้อน แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การเทส่วนผสมลงในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป

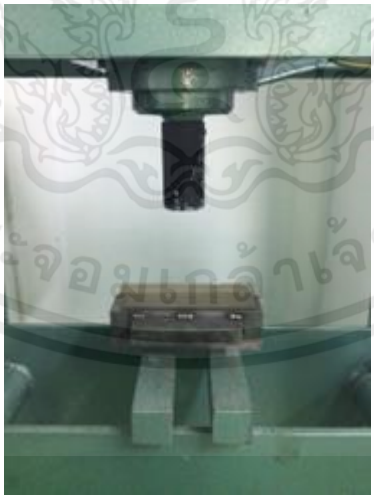
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำแม่พิมพ์วางลงบนเครื่องอัดแบบไฮดรอลิก และทำการอัดขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้แรงในการอัดที่ 4 ตัน เป็นเวลา 1 นาที แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การอัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิก

หลังจากอัดชิ้นงาน 1 นาที นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์เหล็ก และวางไว้ในถาดสำหรับบ่ม 1 นาทีเพื่อให้ชิ้นงานเซตตัว แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อขึ้นรูปชิ้นงานเสร็จแล้ว ทำการบ่มเป็นเวลา 28 วัน เพื่อให้ชิ้นงานมีการเซตตัวสมบูรณ์ที่สุด แสดงดังรูปที่ 3.13

รูปที่ 3.13 การบ่มชิ้นงานด้วยการพรมน้ำ

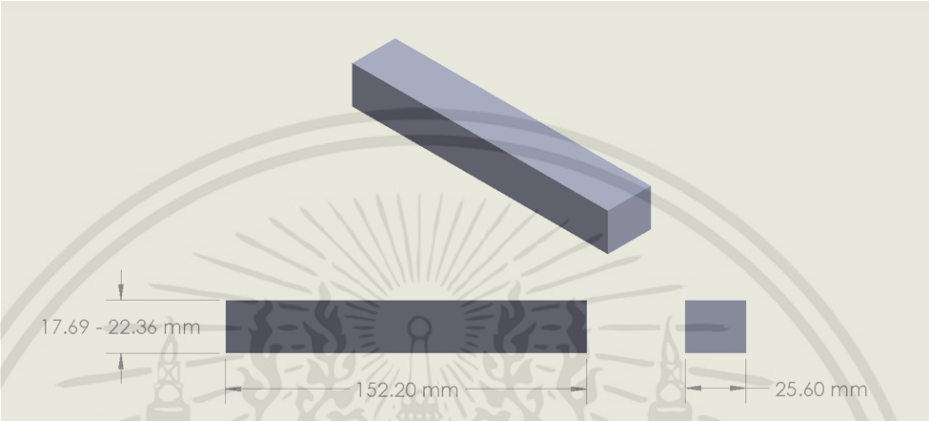
ขั้นตอนสุดท้าย หลังจากการบ่มชิ้นงานครบ 28 วัน นำไปอบในเตาที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้ชิ้นงานแห้งพร้อมทดสอบสมบัติต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.14

รูปที่ 3.14 การอบชิ้นงานในเตาเพื่อให้ชิ้นงานแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมชิ้นงาน

การเตรียมชิ้นงานคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1185-03 [15] ซึ่งขนาดของชิ้นงานมีขนาดเป็นไปดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ลักษณะทางกายภาพและขนาดของชิ้นงาน

3.4 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ

3.4.1 การทดสอบความเค้นดัด (Bennding test)

การทดสอบนี้ถูกดัดแปลงมาจากมาตรฐานการทดสอบ ASTM C1185 เพื่อประเมินความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปและการบ่มเรียบร้อยแล้ว ชิ้นงานจะถูกนำไปทดสอบในเครื่อง Shimadu AG-X, Japan ดังรูปที่ 3.16 โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นการดัดแบบ 3 จุดเพื่อรองรับแรงในการดัดทำจากวัสดุที่มีความแข็งแรง ดังรูปที่ 3.17 และ 3.18 โดยกำหนดให้ส่วนรองรับมีความยาว 100 มิลลิเมตร และอัตราการรับน้ำหนักคงที่ 0.1 มิลลิเมตร/นาที คำนวณความเค้นดัดโดยใช้สมการที่ 3.1 แสดงการประมวลผลผ่านโปรแกรม TRAPEZIUM X เพื่อวิเคราะห์ผลออกมา ดังรูปที่ 3.19 และ 3.20 โดยมาตรฐานการทดสอบ ASTM C1185 ได้กำหนดค่าของความเค้นดัดมาตรฐานไว้ ถ้ามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 4 MPa จะยอมรับค่านั้นได้ [53]

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \tag{3.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ σ คือ ความเค้นดัด (Flexural strength) มีหน่วยเป็น MPa

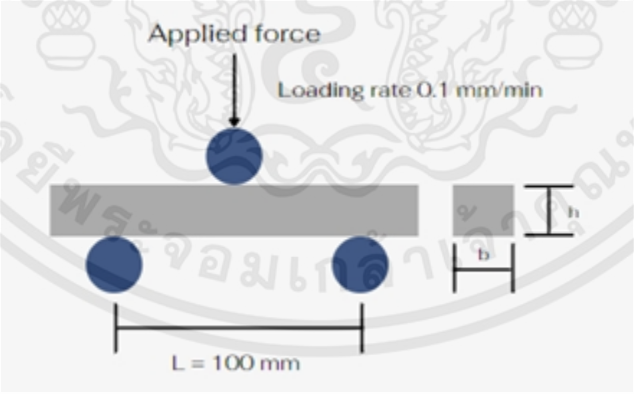
P คือ ค่ารับแรงสูงสุด (Maximum load) มีหน่วยเป็น N

L คือ ความยาวของส่วนรองรับ (Length of span) มีหน่วยเป็น mm

b คือ ความกว้างของชิ้นงาน (Width of specimen) มีหน่วยเป็น mm

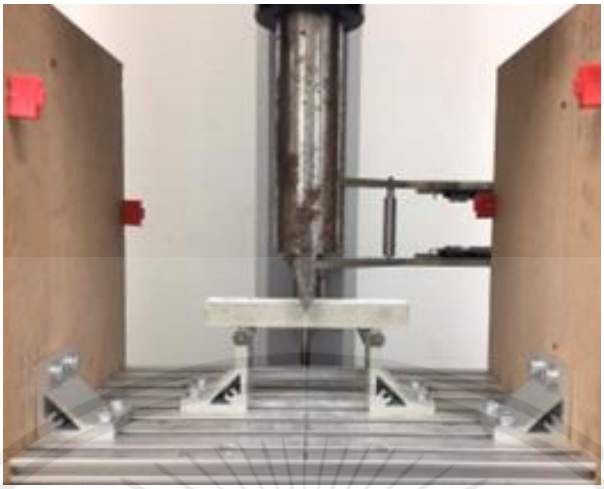
h คือ ความหนาเฉลี่ยของชิ้นงาน (Average thickness of specimen) มีหน่วยเป็น mm

รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบ Shimadu AG-X, Japan

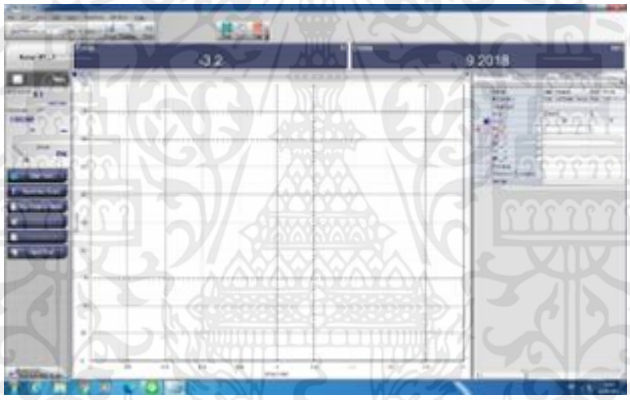


รูปที่ 3.17 การดัดแบบ 3 จุดเพื่อรับความเค้นดัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 การดัดแบบ 3 จุดเพื่อรับความเค้นดัด

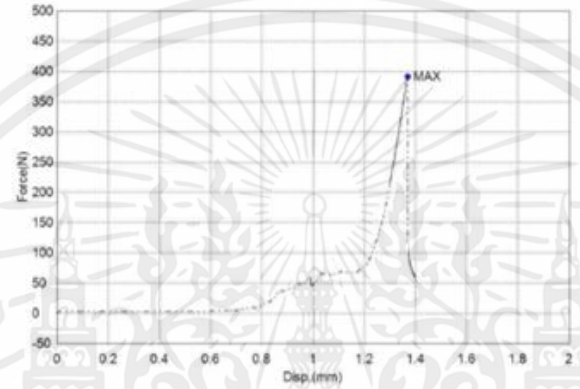


รูปที่ 3.19 โปรแกรม TRAPEZIUM X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Key Word		Product Name	
Test File Name	R4-5.xtak	Method File Name	3 Point bend.xmak
Report Date	7/12/2564	Test Date	7/12/2564
Test Mode	Single	Test Type	3 Point Bend
Speed	0.1mm/min	Shape	Plate
No of Batches:	1	Qty./Batch:	5

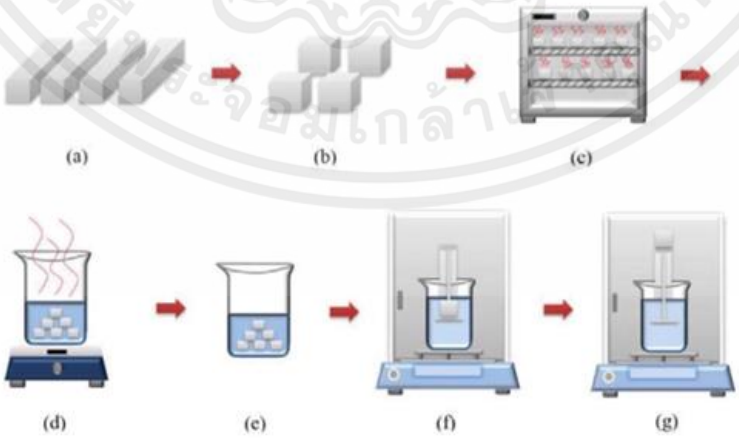
Name / Parameters	Max_Stress Calc. at Entire Areas	Max_Force Calc. at Entire Areas	Max_Stroke Calc. at Entire Areas
Unit	N/mm2	N	mm
R4_1	4.21694	275.215	1.34392
R4_2	5.30321	341.113	0.53163
R4_3	6.41495	384.728	0.48950
R4_4	6.02956	333.309	1.35467
R4_5	6.49026	390.927	1.36981
Average	5.69098	345.058	1.01791
Standard Deviation	0.94879	46.8619	0.46347
Range	2.27332	115.712	0.88031



รูปที่ 3.20 ตัวอย่างผลลัพธ์จากโปรแกรม TRAPEZIUM X

3.4.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

เมื่อได้ชิ้นงานที่ผ่านการบ่ม 28 วัน และนำไปอบไล่ความชื้นแล้วจนได้ชิ้นงานที่แข็งแรง จากนั้นเราจะนำมาทดสอบการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM C20 และ ASTM C1185



รูปที่ 3.21 แสดงขั้นตอนการทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.21 เป็นขั้นตอนการทดสอบการดูดซึมน้ำ โดยเริ่มจากการนำชิ้นงานไปตัดให้ได้ขนาดตามมาตรฐานขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว แล้วนำไปชั่งหาน้ำหนักแห้ง จากนั้นนำชิ้นงานที่ตัดแล้วไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ต่อด้วยนำไปแช่ในน้ำที่ต้มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วแช่ชิ้นงานในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน เมื่อครบเวลาจึงนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักในน้ำและชั่งน้ำหนักในอากาศ สุดท้ายเราจะนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำจากสมการที่ 3.2 โดยมีค่ามาตรฐานของการดูดซึมน้ำ เท่ากับ 25%

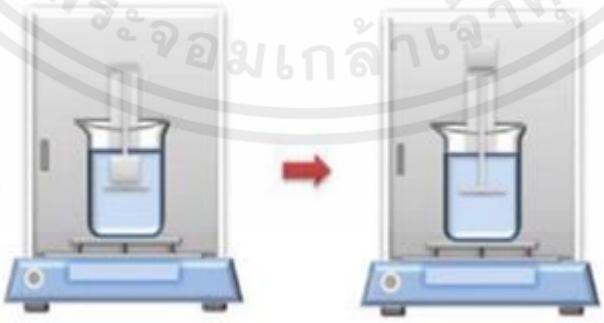
$$\% = \left(\frac{W_s - W_d}{W_d}\right) \times 100 \tag{3.2}$$

โดย W_s คือ น้ำหนักเปียก (กรัม)

W_d คือ น้ำหนักแห้ง (กรัม)

3.4.3 การทดสอบความหนาแน่น (Density)

การทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงาน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C20 และ C1185 โดยขั้นตอนแรกจะนำชิ้นงานไปตัดให้ได้ขนาดมาตรฐาน ขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ขนาดตามมาตรฐานแล้วไปชั่งหาค่าน้ำหนักแห้ง แล้วนำชิ้นงานไปแช่ในน้ำที่ต้มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นแช่ชิ้นงานในน้ำต่อที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำชิ้นงานไปชั่งหาค่าน้ำหนักในน้ำและในอากาศ แสดงดังรูปที่ 3.22 เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณ จากสมการที่ 3.3 และ 3.4 โดยมีค่ามาตรฐานของความหนาแน่นเท่ากับ 1,500 kg/m^3 [54]



รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการหาความหนาแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = \frac{W}{V} \times 1000 \quad (3.3)$$

โดย D คือ ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

W คือ มวลแห้งของชิ้นงาน (กรัม)

V คือ ปริมาตรของชิ้นงาน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$$V = W - S \quad (3.4)$$

โดย V คือ ปริมาตรของชิ้นงาน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

W คือ น้ำหนักเปียก (กรัม)

S คือ น้ำหนักแห้ง (กรัม)

3.4 การวิเคราะห์ผลสมบัติต่าง ๆ ผ่านโปรแกรม Minitab

หลังจากทำการทดสอบหาค่าความเค้นดัด การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM C1185 และ C20 จะนำค่าที่ได้มาใส่ในโปรแกรม Minitab 19 เพื่อวิเคราะห์ผล ซึ่งการวิเคราะห์ผลของโปรแกรมจะมีการวิเคราะห์ทั้งหมด 2 อย่าง คือ Regression for mixtures และ Contour plot ดังแสดงในรูปที่ 3.23 และ 3.24

Regression for Mixtures: Be...

WORKSHEET 3

Regression for Mixtures: Bending Stress, Water Absorption, Density

Regression for Mixtures: Bending Stress versus Water Cement, Sand, Perlite, AR Glass Fiber

The following terms cannot be estimated and were removed:
Perlite*AR Glass Fiber, Water Cement*Perlite*(-), Water Cement*AR Glass Fiber*(-), Sand*AR Glass Fiber*(-), Perlite*AR Glass Fiber*(-)

Estimated Regression Coefficients for Bending Stress (component proportions)

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Water Cement	-4785	291764	*	*	6.58999E+10
Sand	-16223	105247	*	*	1.71318E+10
Perlite	1319	223526	*	*	1.96956E+09
AR Glass Fiber	-52443	142303	*	*	3973280884
Water Cement*Sand	37872	725989	0.05	0.963	1.14487E+11
Water Cement*Perlite	-7859	1180543	-0.01	0.995	7.52115E+09
Water Cement*AR Glass Fiber	382647	2361086	0.16	0.886	1.54287E+09
Sand*Perlite	-8906	307319	-0.03	0.980	9.97954E+08
Sand*AR Glass Fiber	161567	549044	0.29	0.796	1.63022E+08
Water Cement*Sand*Perlite	122177	1037159	0.12	0.917	1.55609E+09
Water Cement*Sand*AR Glass Fiber	-785773	4930470	-0.16	0.888	1.84599E+09
Water Cement*Perlite*AR Glass Fiber	-843510	4925536	-0.17	0.880	3964508040
Sand*Perlite*AR Glass Fiber	389984	1210151	0.32	0.778	4675193.69
Water Cement*Sand*(-)	-55261	230447	-0.24	0.833	2.97693E+08
Sand*Perlite*(-)	-23330	122530	-0.19	0.867	28545864.83

รูปที่ 3.23 การวิเคราะห์ผลแบบ Regression for mixtures

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.24 การวิเคราะห์ผลแบบ Contour plot

ในการวิเคราะห์ผลแบบ Regression for mixtures สามารถเลือกรูปแบบของสมการได้ทั้งหมด 6 รูปแบบ คือ Linear, Quadratic, Speacial cubic, Full cubic, Speacial quadratic และ Full quadratic เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ และสร้างสมการถดถอยเพื่อทำนายค่าของคุณสมบัติต่าง ๆ จากสมการถดถอยสามารถนำไปสร้าง Contour plot เพื่อดูแนวโน้มของข้อมูลได้สำหรับปริญญานิพนธ์เล่มนี้เลือกใช้รูปแบบ Quadratic สำหรับความเค้นดัด การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น

3.5 การเปรียบเทียบผลลัพธ์

เปรียบเทียบผลที่ได้จากสมการทำนายและค่าที่ได้จาการทดลองโดยคำนวณค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นว่ามีมากน้อยแค่ไหน ดังสมการที่ 3.5 ถ้าค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการทำนายมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าสมการทำนายสามารถคาดการณ์ค่าคุณสมบัตินั้น ๆ ได้

$$\%\text{ERROR} = \frac{\text{ค่าที่ได้จากการคำนวน} - \text{ค่าที่ได้จากการทดลอง}}{\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง}} \times 100 \qquad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

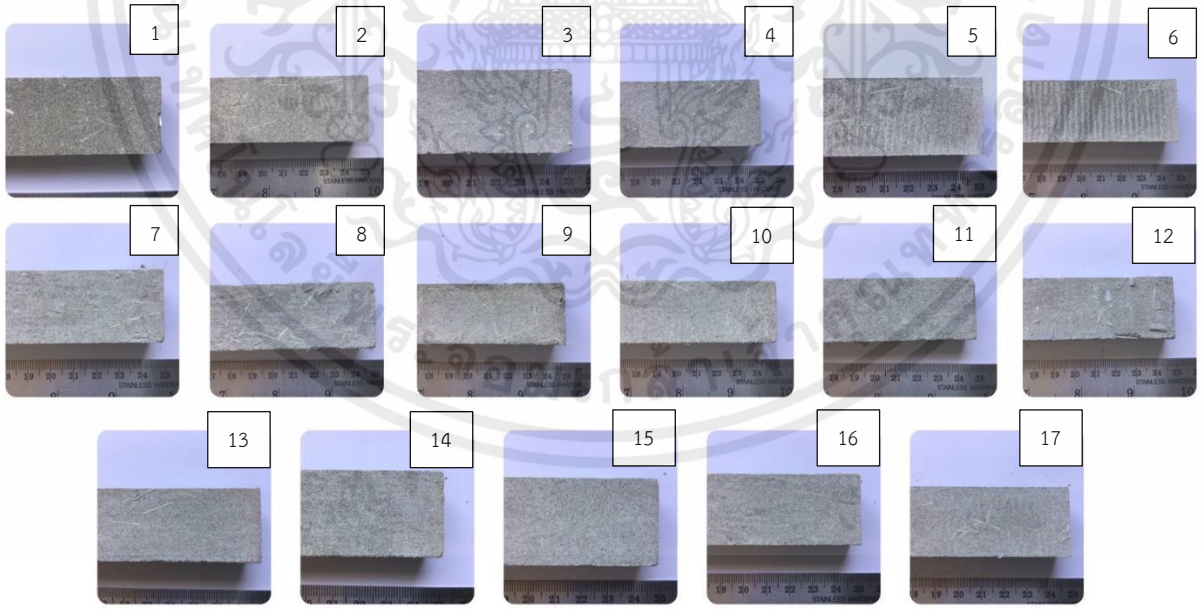
ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ดำเนินงานวิจัยได้ทำการศึกษาและทดลองตามแผนที่วางไว้ในการดำเนินงาน และได้ผลลัพธ์จากการดำเนินงานวิจัย ซึ่งสามารถจำแนกได้ 2 หัวข้อ ดังนี้

4.1 การวิเคราะห์พื้นผิวหน้าชิ้นงาน

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ

4.1 การวิเคราะห์พื้นผิวหน้าชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของชิ้นงานคอนกรีตหลังจากอบชิ้นงาน จะเห็นได้ว่า ผิวหน้าของชิ้นงานทั้ง 17 ชิ้นแตกต่างกันไม่มาก มีสีคล้ายคลึงกัน สีจะสว่างมากหรือน้อย จะขึ้นอยู่กับปริมาณของเพอร์ไลท์ที่ผสมในแต่ละส่วนผสม และในส่วนผสมที่มีเส้นใยแก้วจะมีปริมาณของเส้นใยที่ผิวชิ้นงานแตกต่างกันตามแต่ละสูตรผสม



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างชิ้นงานจากสูตรผสมทั้ง 17 สูตรหลังจากการอบไล่ความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ

4.2.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความเค้นดัด

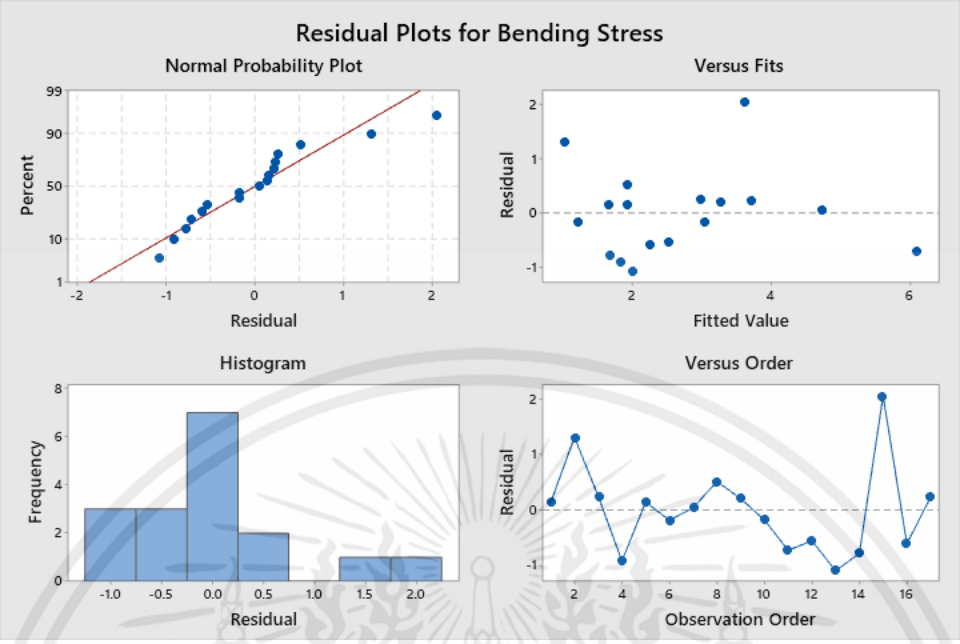
ผลการทดสอบหาค่าความเค้นดัดมากสุด แสดงดังตารางที่ 4.1 และนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความเค้นดัดมากสุดของคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์

สูตรที่	ค่าความเค้นดัดมากสุด (MPa)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
1	2.4520	0.8367
2	0.9082	0.2679
3	1.0483	0.6045
4	5.6910	0.9488
5	1.9801	1.1133
6	1.6524	0.8392
7	0.9164	0.2070
8	3.2507	0.6589
9	1.8131	0.7959
10	2.3374	0.6396
11	5.3893	0.7623
12	2.0819	0.6392
13	0.9217	0.4634
14	4.7842	0.4830
15	3.9624	0.6471
16	3.4861	0.8416
17	2.8718	0.8428

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 พบว่าคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์แสดงค่าความเค้นดัดที่มีแนวโน้มต่ำกว่าระดับมาตรฐานเล็กน้อย ซึ่งค่ามากที่สุดของความเค้นดัดที่ได้มีค่าเท่ากับ 5.691 เมกะปาสคาล ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานอยู่ 1.691 เมกะปาสคาล และค่าน้อยที่สุดของความเค้นดัด มีค่าเท่ากับ 0.9084 เมกะปาสคาล ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานอยู่ 3.0961 เมกะปาสคาล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลการทดลองของความเค้นดัด

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับความเค้นดัดมากสุดของคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์

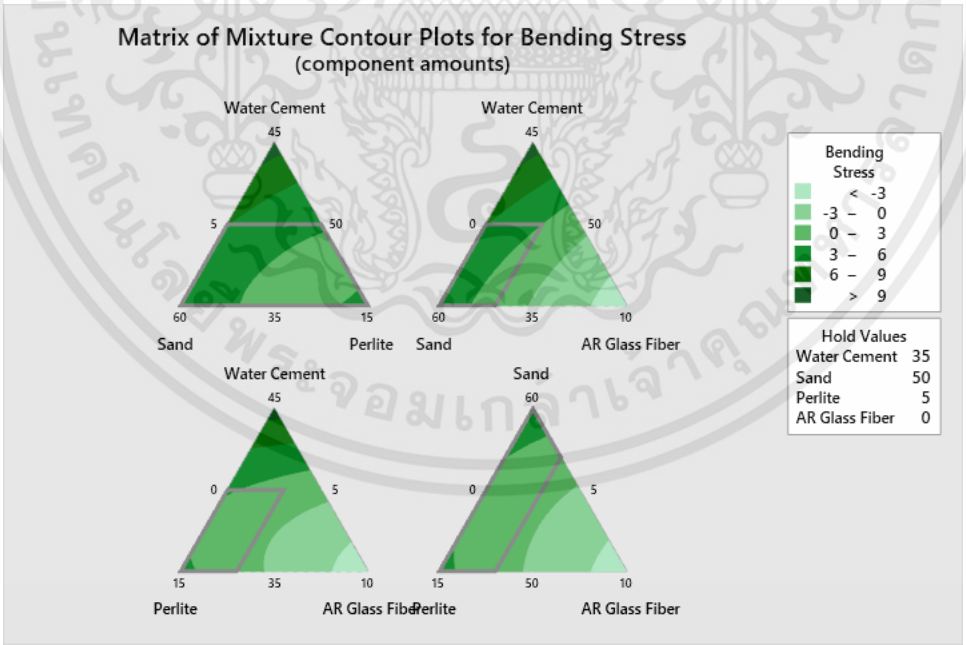
Estimated Regression Coefficients for Bending Stress (component proportion)					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Water Cement	275	1290	*	*	3088971.78
Sand	81	398	*	*	588452.65
Perlite	692	610	*	*	35135.62
AR Glass Fiber	71	854	*	*	3428.67
Water Cement * Sand	-610	3181	-0.19	0.853	5271979.33
Water Cement * Perlite	-1541	3185	-0.48	0.641	131307.58
Water Cement * AR Glass Fiber	-761	3341	-0.23	0.825	7411.38
Sand * Perlite	-656	2054	-0.32	0.757	106913.85
Sand * AR Glass Fiber	-127	855	-0.15	0.886	948.86
Model Summary					
S		R-sq	R-sq (adj)	PRESS	R-sq (pred)
1.13611		73.05%	46.11%	53.9683	0.00%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 ข้อมูลมีการกระจายไร้รูปแบบ ซึ่งแสดงว่ามีความอิสระของข้อมูลนั่นคือ ข้อมูลเก็บมาอย่างสุ่ม นอกจากนั้นกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นถึงความเป็นปกติของข้อมูลที่ได้ดำเนินการทดลองและจากการวิเคราะห์ตารางที่ 4.2 พบว่า ปัจจัยต้นทั้งหมดมีผลต่อความเค้นดัดทั้งสิ้น แต่หากพิจารณาความสัมพันธ์อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย ค่า P-value มีค่าสูงกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 เมื่อนำปัจจัยที่มีผลต่อความเค้นดัดจากการทดลองแบบผสมมาทำการวิเคราะห์การถดถอยต่อแบบ Quadratic เพื่อสร้างสมการถดถอยประมาณค่าความเค้นดัดมากสุดและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ดังแสดงในสมการที่ 4.1

$$\text{Bending Stress} = 275A + 81B + 692C + 71D - 610AB - 1541AC - 761AD - 656BC - 127BD \quad (4.1)$$

เมื่อ A=Water/Cement, B=Sand, C=Perlite และ D=AR Glass fiber โดยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 73.05% หมายความว่า ในการผันแปรของค่าความหนาแน่นทั้งหมด 100% สมการถดถอยนี้สามารถ พยากรณ์ค่าความเค้นดัดได้แม่นยำถึง 73.05% เมื่อนำสมการที่ได้ไปทำการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้กราฟพื้นที่ผิว วิเคราะห์ค่าความเค้นดัดของคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์ที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟพื้นที่ผิวสำหรับความเค้นดัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการทำนายและการทดสอบของความเค้นดัด

สูตรที่	ค่าความเค้นดัดจากสมการทำนาย (MPa)	ค่าความเค้นดัดจากการทดสอบ (MPa)	% ความผิดพลาด
1	1.9078	2.4520	22.1931
2	1.6559	0.9082	82.3842
3	1.1925	1.0483	13.7556
4	3.6070	5.6910	36.6200
5	2.5067	1.9801	26.5949
6	2.2330	1.6524	35.1387
7	1.8120	0.9164	97.7282
8	2.9808	3.2507	8.3028
9	1.6293	1.8131	10.1373
10	0.9969	2.3374	57.3519
11	6.0900	5.3893	13.0017
12	1.9250	2.0819	7.5364
13	1.9841	0.9217	115.2632
14	4.7025	4.7842	1.7077
15	3.6975	3.9624	6.6853
16	3.2600	3.4861	6.4858
17	3.0208	2.8718	5.1895
		% ความผิดพลาดเฉลี่ย	32.1189

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ได้จากสมการทำนายและการทดสอบของความเค้นดัด พบว่ามีความคลาดเคลื่อน 32.1189% เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุเปราะเมื่อนำไปทำการทดสอบคุณสมบัติทางกล ค่าจะมีความแปรปรวนมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

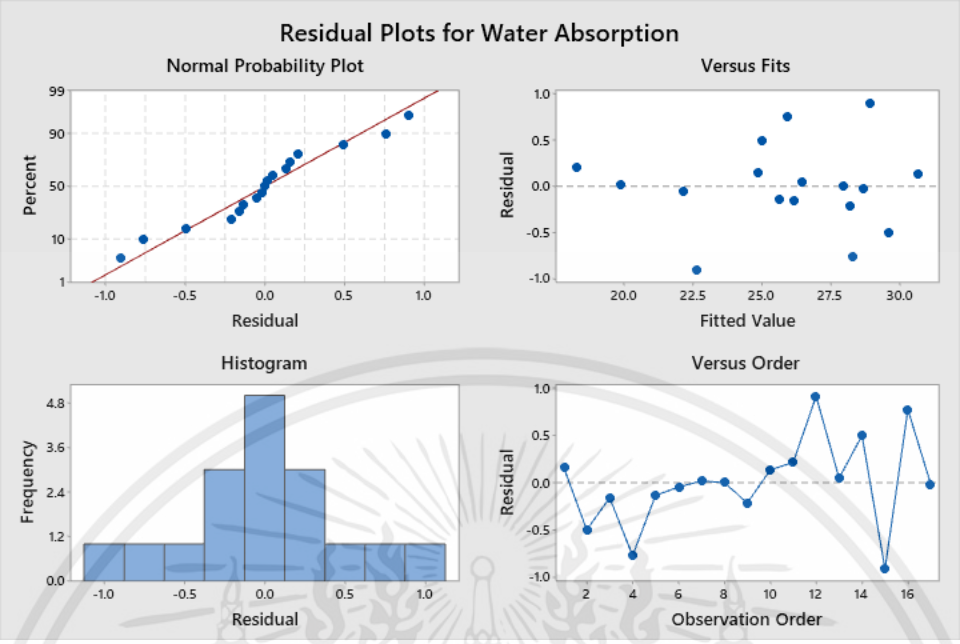
ผลการทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นการดูดซึมน้ำ แสดงดังตารางที่ 4.4 และนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์

สูตรที่	เปอร์เซนต์การดูดซึมน้ำ (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
1	27.96	0.5496
2	25.50	0.9170
3	30.80	2.2118
4	21.74	1.3084
5	29.84	1.5528
6	26.71	0.5868
7	27.52	0.1383
8	26.01	1.0392
9	25.53	1.6211
10	29.11	0.5428
11	18.50	0.3211
12	25.00	0.7873
13	26.50	0.3177
14	19.91	0.7340
15	28.70	0.3986
16	28.02	0.3963
17	22.08	1.1031

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.4 พบว่า คอนกรีตพบว่าคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์แสดงค่าการดูดซึมน้ำที่มีแนวโน้มสูงกว่าระดับมาตรฐานเล็กน้อย ซึ่งค่าน้อยที่สุดของการดูดซึมน้ำที่ได้มีค่าเท่ากับ 18.50% ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานอยู่ 6.5 และค่ามากที่สุดของการดูดซึมน้ำมีค่าเท่ากับ 30.80% ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานอยู่ 5.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลการทดลองของการดูดซึมน้ำ

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับการดูดซึมน้ำของคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์

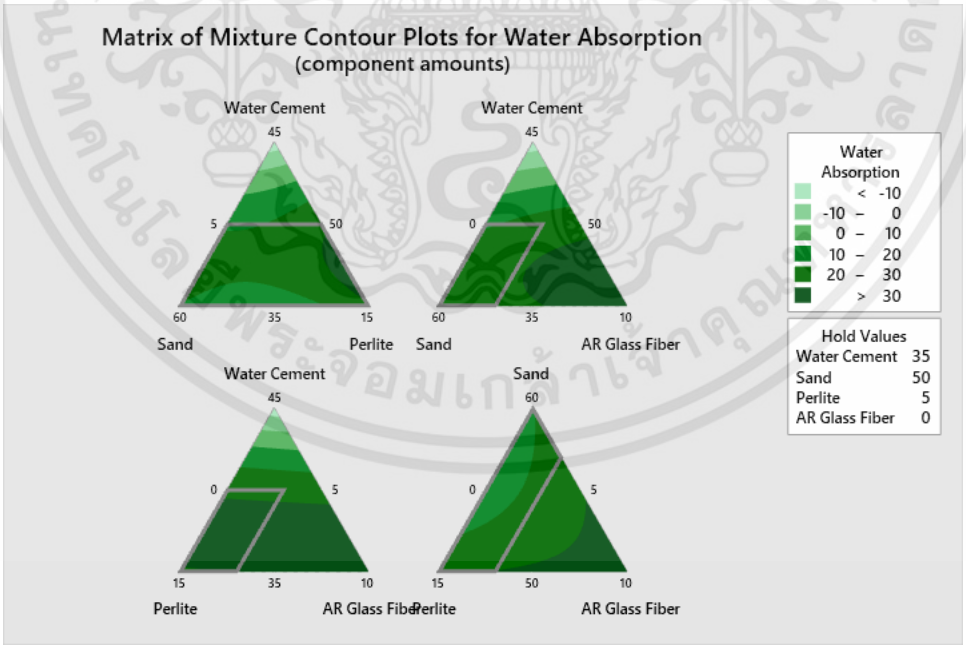
Estimated Regression Coefficients for Water Absorption (component proportion)					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Water Cement	-2789	1863	*	*	3088971.78
Sand	-799	575	*	*	588452.65
Perlite	398	881	*	*	35135.62
AR Glass Fiber	-1423	1233	*	*	3428.67
Water Cement * Sand	6767	4595	1.47	0.179	5271979.33
Water Cement * Perlite	8575	4601	1.86	0.099	131307.58
Water Cement * AR Glass Fiber	6913	4827	1.43	0.190	7411.38
Sand * Perlite	-3858	2967	-1.30	0.230	106913.85
Sand * AR Glass Fiber	-1041	1236	0.84	0.424	948.86
Model Summary					
S		R-sq	R-sq (adj)	PRESS	R-sq (pred)
1.64134		88.87%	77.74%	147.015	24.09%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 ข้อมูลมีการกระจายไร้รูปแบบ ซึ่งแสดงว่ามีความอิสระของข้อมูลนั่นคือข้อมูลเก็บมาอย่างสุ่ม นอกจากนั้น กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นถึงความเป็นปกติของข้อมูลที่ได้ดำเนินการทดลองและจากการวิเคราะห์ตารางที่ 4.5 พบว่าปัจจัยต้นทั้งหมดมีผลต่อการดูดซึมน้ำทั้งสิ้น แต่หากพิจารณาความสัมพันธ์อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย ค่า P-value มีค่าสูงกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 เมื่อนำปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซึมน้ำจากการทดลองแบบผสมมาทำการวิเคราะห์การถดถอยต่อแบบ Quadratic เพื่อสร้างสมการถดถอยประมาณค่าความหนาแน่นและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ดังแสดงในสมการที่ 4.2

$$\text{Water Absorption} = -2789A - 799B + 398C - 1423D + 6767AB + 8575AC + 6913AD - 3858BC + 1041BD \quad (4.2)$$

เมื่อ A=Water/Cement, B=Sand, C=Perlite และ D=AR Glass fiber โดยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 88.87% หมายความว่า ในการผันแปรของค่าความหนาแน่นทั้งหมด 100% สมการถดถอยนี้สามารถพยากรณ์ค่าการดูดซึมน้ำได้แม่นยำถึง 88.87% เมื่อนำสมการที่ได้ไปทำการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้กราฟพื้นที่ผิว วิเคราะห์ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์ที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซึมน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการทำนายและการทดสอบของการดูดซึมน้ำ

สูตรที่	การดูดซึมน้ำจากสมการทำนาย (%)	การดูดซึมน้ำจากการทดสอบ (%)	% ความผิดพลาด
1	26.92	27.96	3.85
2	25.95	25.50	1.74
3	30.52	30.80	0.93
4	23.87	21.74	8.92
5	27.71	29.84	7.68
6	27.20	26.71	1.80
7	28.58	27.52	3.71
8	24.05	26.01	8.13
9	26.14	25.53	2.35
10	29.20	29.11	0.32
11	19.00	18.50	2.61
12	27.11	25.00	7.79
13	27.71	26.50	4.36
14	19.74	19.91	0.85
15	29.11	28.70	1.42
16	28.20	28.02	0.64
17	22.29	22.08	0.92
		% ความผิดพลาดเฉลี่ย	3.41

จากตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ได้จากสมการทำนายและการทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำ พบว่ามีความคลาดเคลื่อน 3.41% ซึ่งถือว่าคลาดเคลื่อนเล็กน้อย จึงสามารถสรุปได้ว่าสมการที่ 4.2 สามารถคำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความหนาแน่น

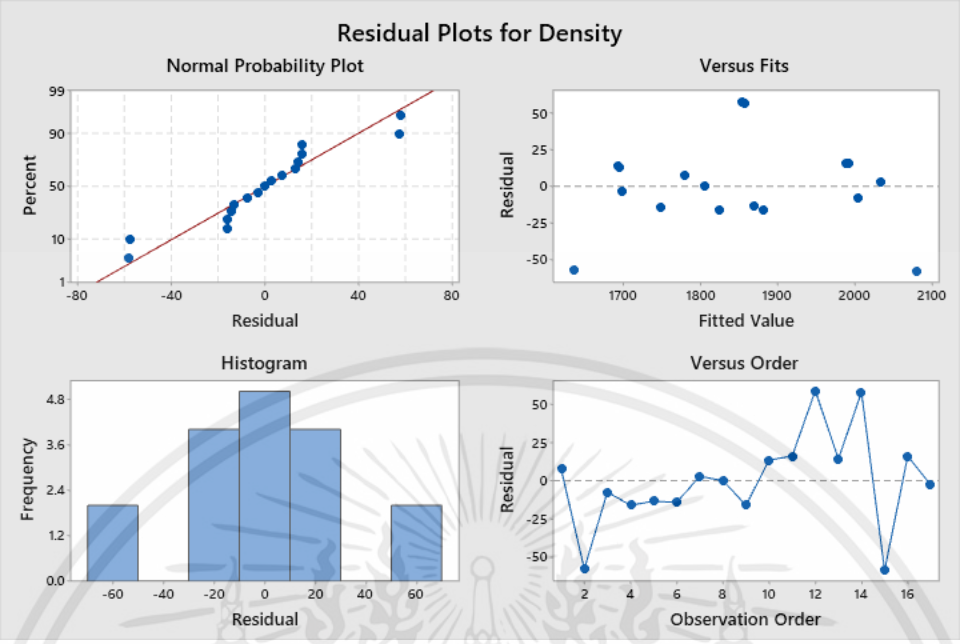
ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่น แสดงดังตารางที่ 4.7 และนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์

สูตรที่	ค่าความหนาแน่น (kg/m^3)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
1	1,806.05	142.2674
2	1,914.49	159.1352
3	1,706.96	182.9122
4	2,022.11	166.6619
5	1,912.55	25.2323
6	2,008.27	44.5213
7	1,808.61	105.9532
8	1,998.17	49.6797
9	1,855.53	278.8352
10	1,578.58	154.4200
11	2,005.80	78.5103
12	1,787.40	160.1496
13	1,707.04	164.8691
14	2,036.65	82.1304
15	1,694.50	60.9997
16	1,866.20	40.4715
17	1,733.96	206.5366

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.7 พบว่าคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์แสดงค่าความหนาแน่นที่มีแนวโน้มสูงกว่าระดับมาตรฐานเล็กน้อย ซึ่งค่าน้อยที่สุดของความหนาแน่นที่ได้มีค่าเท่ากับ 1,578.58 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานอยู่ 78.58 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่ามากที่สุดของความหนาแน่นมีค่าเท่ากับ 2,036.65 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานอยู่ 536.65 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลการทดลองของความหนาแน่น

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับความหนาแน่นของคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์

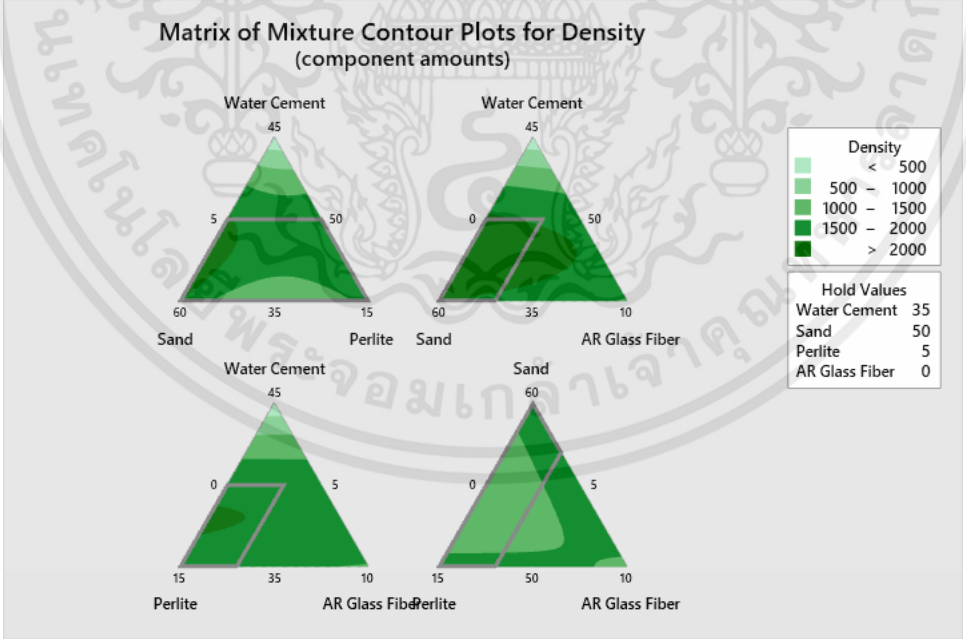
Estimated Regression Coefficients for Density (component proportion)					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Water Cement	-163079	106819	*	*	3088971.78
Sand	-47541	32985	*	*	588452.65
Perlite	108195	50486	*	*	35135.62
AR Glass Fiber	-86661	70690	*	*	3428.67
Water Cement * Sand	407010	263447	1.54	0.161	5271979.33
Water Cement * Perlite	378037	263778	1.43	0.190	131307.58
Water Cement * AR Glass Fiber	418190	276726	1.51	0.169	7411.38
Sand * Perlite	-329709	170100	-1.94	0.089	106913.85
Sand * AR Glass Fiber	26381	70384	0.37	0.719	948.86
Model Summary					
S		R-sq	R-sq (adj)	PRESS	R-sq (pred)
94.0948		79.69%	53.38%	1112624	0.00%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 ข้อมูลมีการกระจายไร้รูปแบบ ซึ่งแสดงว่ามีความอิสระของข้อมูลนั่นคือข้อมูลเก็บมาอย่างสุ่ม นอกจากนั้นกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นถึงความเป็นปกติของข้อมูลที่ได้ดำเนินการทดลอง จากการวิเคราะห์ตารางที่ 4.8 พบว่าปัจจัยต้นทั้งหมดมีผลต่อความหนาแน่นทั้งสิ้น แต่หากพิจารณาความสัมพันธ์อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย ค่า P-value มีค่าสูงกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 เมื่อนำปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นจากการทดลองแบบผสมมาทำการวิเคราะห์การถดถอยต่อแบบ Quadratic เพื่อสร้างสมการถดถอยประมาณค่าความหนาแน่นและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ดังแสดงในสมการที่ 4.3

$$\text{Density} = -163079A - 47541B + 108195C - 86661D + 407010AB + 378037AC + 418190AD - 329709BC + 26381BD \quad (4.3)$$

เมื่อ A=Water/Cement, B=Sand, C=Perlite และ D=AR Glass fiber โดยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 94.94% หมายความว่า ในการผันแปรของค่าความหนาแน่นทั้งหมด 100% สมการถดถอยนี้สามารถพยากรณ์ความหนาแน่นได้แม่นยำถึง 94.94% เมื่อนำสมการที่ได้ไปทำการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้กราฟพื้นที่ผิววิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์ที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟพื้นที่ผิวสำหรับความหนาแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการทำนายและการทดสอบของความหนาแน่น

สูตรที่	ค่าความหนาแน่นจากสมการทำนาย (%)	ค่าความหนาแน่นจากการทดสอบ (%)	% ความผิดพลาด
1	1,821.06	1,806.05	0.83
2	1,824.46	1,914.49	4.70
3	1,643.89	1,706.96	3.69
4	1,955.54	2,022.11	3.29
5	1,854.09	1,912.55	3.06
6	1,959.97	2,008.27	2.41
7	1,915.43	1,808.61	5.91
8	1,933.21	1,998.17	3.25
9	1,893.45	1,855.53	2.04
10	1,693.93	1,578.58	7.31
11	2,066.54	2,005.80	3.03
12	1,832.94	1,787.40	2.55
13	1,647.64	1,707.04	3.48
14	2,003.98	2,036.65	1.60
15	1,726.62	1,694.50	1.90
16	1,855.43	1,866.20	0.58
17	1,814.33	1,733.96	4.63
		% ความผิดพลาดเฉลี่ย	3.19

จากตารางที่ 4.9 แสดงให้เห็นถึงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ได้จากสมการทำนายและการทดสอบของความหนาแน่น พบว่ามีความคลาดเคลื่อน 3.19% ซึ่งถือว่าคลาดเคลื่อนเล็กน้อย จึงสามารถสรุปได้ว่าสมการที่ 4.3 สามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุผสมที่นำมาใช้ทดแทนแร่ใยหินในการทำคอนกรีตโดยใช้เพอร์ไลท์แทนแร่ใยหินโดยออกแบบการทดลองแบบ Extreme vertices ได้ส่วนผสมทั้งหมด 17 ส่วนผสม ที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ ทราย เพอร์ไลท์และเส้นใยอัลคาไลน์แตกต่างกัน จึงทำให้ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกล เช่น ความเค้นดัด การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองเพื่อพัฒนาวัสดุคอนกรีตคอมโพสิตโดยมีการผสมเพอร์ไลท์ เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติ สามารถสรุปได้ว่าทุกปัจจัยมีผลต่อค่าความเค้นดัด การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของคอนกรีตคอมโพสิตผสมเพอร์ไลท์ สามารถสร้างสมการถดถอยประมาณค่าความเค้นดัด และสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ได้ดังสมการ Bending Stress = 275A + 81B + 692C + 71D - 610AB - 1541AC - 761AD - 656BC - 127BD ซึ่งสามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องถึง 73.05% และสามารถสร้างสมการถดถอย ประมาณค่าการดูดซึมน้ำและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ได้ดังสมการ Water Absorption = - 2789A - 799B + 398C - 1423D + 6767AB + 8575AC + 6913AD - 3858BC + 1041BD ซึ่งสามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องถึง 88.87% และสามารถสร้างสมการถดถอยประมาณค่าความหนาแน่นอีกทั้งวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ได้ดังสมการ Density = - 163079A - 47541B + 108195C - 86661D + 407010AB + 378037AC + 418190AD - 329709BC + 26381BD ซึ่งสามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องถึง 79.69%

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากคอนกรีตคอมโพสิตเป็นวัสดุที่แข็งและเปราะ ในการทดสอบสมบัติต่าง ๆ จะทำให้เกิดการแปรปรวนของผลลัพธ์ได้ จึงต้องเพิ่มจำนวนของชิ้นงาน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] K.R. Spurny., On the filtration of fibrous aerosols., 17(3), 1986, pp. 0–455.

[2] International Agency for Research on Cancer. Asbestos (chrysotile, amosite, crocidolite, tremolite, actinolite, and anthophyllite). IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum, 2012, pp. 219–309.

[3] Resolution concerning asbestos. In: Provisional Record 20 of the Ninety-fifth Session of the International Labour Conference, 31 May – 16 June 2006, Geneva : Report of the Committee on Safety and Health International Labour Organization, 2006.

[4] Virta R., Worldwide asbestos supply and consumption trends from 1900 through 2003. Circular 1298. Reston (VA) : United States Department of the Interior, United States Geological Survey, 2006.

[5] Payam S., Iman A., and Norhayati B., Concrete as a thermal mass material for building applications, 2018, pp. 15-25.

[6] Bjorn B., The Ecology of Building Materials, Translated by Butters Chris and Henley Filip, Elsevier, 2009, pp. 1–421.

[7] Rashad A. M., A synopsis about perlite as building material – A best practice guide for Civil Engineer. Construction and Building Materials, 121(), 2016, pp. 338–353.

[8] Alleman J. E. & Mossman B. T., Asbestos Revisited. Scientific, 1997, pp. 54–57.

[9] https://hmong.in.th/wiki/Chrysotile. (พฤษภาคม,2565)

[10] การทำงานและการควบคุมอันตรายจากใยหิน, 2556.

[11] กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, กระทรวงอุตสาหกรรม, รายงานนำเข้า-ส่งออกแร่ของประเทศไทย, 2556.

[12] กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน, สถาบันความปลอดภัยในการทำงาน, รายงานโครงการศึกษาสภาพแวดล้อมการทำงานและสุขภาพลูกจ้างในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับแร่ใยหิน.

[13] Peto J., The European mesothelioma epidemic, B. J. Cancer Vol. 79, February, 1999.

[14] มะเร็งปอดจากแอสเบสตอส, บัญญัติศรีงาม, สำนักวิทยบริการ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2548.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[15] https://wtg.co.th/th/news/knowledge-insulated-sandwich-panel/413-what-is-asbestos (พฤษภาคม, 2565)

[16] Selikoff I.J. and Hammond E.C., Asbestos exposure, cigarette smoking and death rates, 1979.

[17] Irving J. S. and Hammond E. C., Asbestos and Smoking".The journal of the American Medical Assosiation, 1979.

[18] ISUZU, อันตรายจากผ้าเบรกผสมแร่ใยหิน, 2563.

[19] Barreiro T.J., Katzman P.J., Malignant mesothelioma: a case presentation and review. The Journal of the American Osteopathic Association, 2006.

[20] สถาบันส่งเสริมความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน(องค์กรมหาชน), แร่ใยหิน(Asbestos), 2563.

[21] Laurie kazan –Allen Asbestos battle continues , 2009.

[22] V. Subramanian, N. Madhavan, Asbestos problem in India. School of Environmental Sciences, Jawaharlal Nehru University, 2005.

[23] กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน, สถาบันความปลอดภัยในการทำงาน, แนวปฏิบัติการทำงานกับแอสเบสตอสอย่างปลอดภัย, 2543.

[24] พิภพ สุนทรสมัย, "วัสดุวิศวกรรมก่อสร้าง", สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2546.

[25] ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, "คอนกรีตเทคโนโลยี (Concrete Technology)", ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง, 2540.

[26] SCG, "ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คืออะไร". (พฤษภาคม,2565)

[27] มานพ แก้วโมราเจริญ, Structural Material and Testing - Cement, 2554.

[28] A. M. Neville, Properties of concrete, 1979.

[29] Teeraphon, 5 ประเภท ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เหมาะกับงานใดบ้าง?, 2020.

[30] พงศกร วรรณะพาหุณ, สิ่งดี ๆ ที่เรียกว่า "น้ำ", 2015.

[31] ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, คอนกรีตเทคโนโลยี (Concrete Technology), คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค, บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด, 2537.

[32] ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับทราย. (พฤษภาคม, 2565).

[33] https://www.novabizz.com/CDC/Materials/105-Sand.htm (พฤษภาคม, 2565).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[34] PSTC, ทรายที่ใช้ก่อสร้างมีทั้งหมดกี่ชนิด?, 2563.

[35] อรุณ ชัยเสรี, เกร็ดความรู้เกี่ยวกับการคุมงานก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในบรมราชูปถัมภ์, 2541.

[36] ACI Committee 308, ACI 308R-92 : Standard Practice for Curing Concrete, 2002.

[37] ACI Committee 308, ACI 308.1R-98 : Standard Specification for Curing Concrete, 2002.

[38] สถิตย์พงษ์ วงศ์สง่า, สุภาวดี เสริมรัมย์,เชาว์วัติ ดงกลาง, นันทเชษฐ์ ชัยทิพย์, และประสบโชค เปือยหนองแข้, อิทธิผลและดัชนีวัดผลของวิธีการบ่มที่แตกต่างกันต่อกำลังอัดของคอนกรีตทั่วไป, บทความวิจัย, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา, 2562, หน้า 28 – 29.

[39] ภาคภูมิ วานิชกมลนันท์, อิทธิพลของการบ่มต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในพื้น POST TENSION, 2559.

[40] กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, เพอร์ไลท์, 2549.

[41] Tress.com Staff, What is Perlite? What is its use in the garden?, 2022.

[42] https://sftec.ca/applications-of-ar-glass-fiber/ (พฤษภาคม, 2565)

[43] Kwan, W. H., Cheah, C. B., Ramli, M., & Chang, K. Y., Alkali-resistant glass fiber reinforced high strength concrete in simulated aggressive environment. Materiales De Construction, 68(329), e147, 2008.

[44] ศักดิ์สิทธิ์ ศรีแสง, การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุผสม สำหรับคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย และเส้นใยมะพร้าว, ปริญญานิพนธ์, มหาวิทยาลัยศรีนครินวิโรฒ, 2549, หน้า 8.

[45] Patthanavarit, J., Kitiwan, M. and Tunthawiroon, P., Effect of Expanded Perlite on Physical and Mechanical Properties of Cement Mortar, 2021, pp. 1-3.

[46] Akyuncu, V., and Sanliturk, F., Investigation of physical and mechanical properties of mortars produced by polymer coated perlite aggregate. Journal of Building Engineering, 2021.

[47] Cheng, C., Hong S., Zhang Y., and He Ju., Effect of expanded polystyrene on the flexural behavior of lightweight glass fiber reinforced cement, Construction and Building Materials, 265(), 120328.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[48] Choi, H., & Choi, Y. C., Setting characteristics of natural cellulose fiber reinforced cement composite, Construction and Building Materials, 2021, pp.271.

[49] Yildizel S. A., Tayeh B. A., and Calis G., Experimental and modelling study of mixture design optimisation of glass fibre-reinforced concrete with combined utilisation of Taguchi and Extreme Vertices Design Techniques., j mater res technol, 2020.

[50] อิศรพงษ์ พงษ์ศิริกุล, การวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับอุตสาหกรรมเกษตร, ภาควิชาเทคโนโลยีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2544.

[51] Raymond H. Myers and Douglas C. Montgomery, 1995.

[52] Chandrasekaran R. G., & Ramakrishna, Experimental investigation on mechanical properties of economical local natural fibre reinforced cement mortar, Materials Today: Proceedings, 2021, pp. 7633–7638.

[53] ASTM C 1185-3, "Standard Test Methods for Sampling and Testing Non-Asbestos Fiber-Cement Flat Sheet, Roofing and Siding Shingles, and Clapboards" in ASTM International (West Conshohocken, PA, 2016), pp. 1–9.

[54] ASTM C20-00, Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water in ASTM International (West Conshohocken, PA, 2015), pp. 1–3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้