

อิทธิพลของอัตราส่วนผสมระหว่างเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่น
ต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2559

**INFLUENCE OF MIXING RATIO BETWEEN MELAMINE
WASTE GRANULE AND POWDER ON THE
MECHANICAL PROPERTIES OF
LIGHTWEIGHT CONCRETE**

Sasiprapa Srichaiyo



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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2016

อิทธิพลของอัตราส่วนผลสมระหว่างเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นต่อสมบัติ
เชิงกลของคอนกรีตมวลเบา

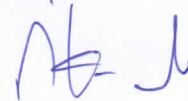
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(อ. ดร.ปิยมณ พ้วพงษ์กร)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.กัญชลา สุดตาชาติ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



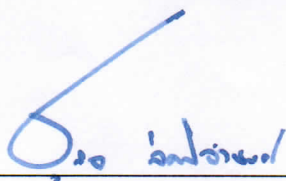
(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ



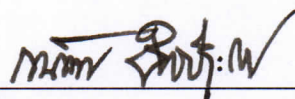
(ผศ. ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ)

กรรมการ



(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปิงานงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ชร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศศิประภา ศรีไชโย : อิทธิพลของอัตราส่วนผสมระหว่างเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่น
ต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา (INFLUENCE OF MIXING RATIO BETWEEN
MELAMINE WASTE GRANULE AND POWDER ON THE MECHANICAL
PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT CONCRETE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.กัญชลา สุคตาทิ, 131 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนผสมระหว่างเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบ
ฝุ่นต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา การใช้ประโยชน์เศษเมลามีนเป็นมวลรวมละเอียดใน
คอนกรีตมวลเบา โดยมวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานวิจัยจะประกอบด้วยทรายและเศษเมลามีน ซึ่ง
ทรายถูกแทนที่ด้วยเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ด้วยอัตราส่วนเม็ดต่อ
ฝุ่น 50:50, 75:25, 85:15 และ 90:10 กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และซีเมนต์ต่อมวลรวมเท่ากับ
0.5 และ 1 ตามลำดับ ควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ 1,100 และ 1,300 kg/m³ การ
ทดสอบกำลังรับแรงอัดจะใช้ตัวอย่างที่มีอายุบ่ม 7, 14, 28 และ 60 วัน การทดสอบการดูดซึมน้ำ
และการทดสอบการนำความร้อนจะใช้ตัวอย่างที่มีอายุบ่มครบ 28 วันในการทดสอบ

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดพบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนให้กำลังรับแรงอัดที่
เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ เนื่องจากเศษเมลามีนช่วยปรับปรุงขนาดผลึกของมวล
รวมละเอียดให้ดีขึ้น และเศษเมลามีนมีรูปร่างมีเหลี่ยมมุมผิวหยาบทำให้ซีเมนต์เพสต์และเศษเมล
ามีนยึดเกาะได้ดี ส่งผลให้คอนกรีตมวลเบาที่มียึดเกาะตัวแน่นจึงสามารถรับแรงอัดได้เพิ่มขึ้น และผล
การทดสอบการดูดซึมน้ำพบว่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเศษเมลามีน
มีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าทราย ทั้งนี้อัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น 90:10 เป็นสูตรผสมที่
ให้ค่ากำลังรับแรงอัดและค่าการดูดซึมน้ำสามารถนำไปใช้งานตามเกณฑ์ มอก เลขที่. 2601-2556

ผลการศึกษาทำให้ทราบถึงอิทธิพลของอัตราส่วนเศษเมลามีนที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของ
คอนกรีตมวลเบา และเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์เศษเมลามีนในคอนกรีตมวลเบา ทั้งนี้
อัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น 90:10 ยังสามารถรีไซเคิลเศษเมลามีนได้ทั้งเศษเมลามีน
แบบเม็ดและแบบฝุ่น โดยเฉพาะเศษเมลามีนแบบเม็ดเป็นของเสียที่มีปริมาณมากทำให้มีค่าใช้จ่าย
ในการกำจัด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเศษเมลามีนสามารถปรับปรุงความแข็งแรงคอนกรีตมวลเบาให้
เพิ่มขึ้น ลดการใช้ทรายซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติ การใช้ประโยชน์ของเสียโดยนำกลับมาใช้ใหม่
ในคอนกรีตมวลเบา รวมถึงสามารถพัฒนาให้ผลิตคอนกรีตมวลเบาในเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต

สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา ศศิประภา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.กัญชลา

SASIPRAPA SRICHAIYO : INFLUENCE OF MIXING RATIO BETWEEN
MELAMINE WASTE GRANULE AND POWDER ON THE MECHANICAL
PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT CONCRETE. THESIS ADVISOR : ASST.
PROF. KANCHALA SUDTACHAT, Ph.D., 131 PP.

MELAMINE WASTE / MECHANICAL PROPERTIES /LIGHTWEIGHT CONCRETE

This research investigates influence of mixing ratio between melamine waste granule and powder on mechanical properties in lightweight concrete. By river sand was replaced with melamine waste at 25% weight. Melamine waste granule to powder ratio of 50:50, 75:25, 85:15 and 90:10. Water to cement ratio and cement to aggregate ratio were constant 0.5 and 1 respectively. Fresh concrete was controlled density at 1,100 and 1,300 kg/m³. Compressive test was tested at curing age of 7, 14, 28 and 60 days. Water absorption and thermal conductivity were tested at curing age of 28 day.

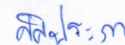
The results revealed that melamine waste in lightweight concrete lead to increasing of compressive strength compared with reference lightweight concrete. It might due to better gradation of fine aggregate and angular shape of melamine waste were influenced to good cement paste adhesion lead to higher compressive strength. Water absorption has increased owing to the higher water absorption of melamine waste than sand. It was found that melamine waste granule to powder ratio MFGP90:10 was conform to (TIS 2601-2556) in term of compressive strength and water absorption and could be recycled two type of melamine waste. Particularly, melamine waste granule. Therefore, It cloud be concluded that melamine waste improved the mechanical properties of concrete, reduced sand and reuse melamine waste in lightweight concrete. Moreover, this research can develop to producing commercial melamine lightweight concrete waste in the future.

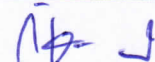
School of Manufacturing Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature

Advisor's Signature





กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องด้วยความอนุเคราะห์จาก บุคคลและหน่วยงานที่ให้ความช่วยเหลืออย่างดีทั้งทางด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ สนับสนุนทุน และอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการดำเนินงานวิจัยเป็นอย่างดีเสมอมา ดังนี้

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึงบุคลากรประจำสำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตที่มอบโอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำในการจัดทำ เอกสารงานวิจัยต่าง ๆ รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ให้ความช่วยเหลือในการเข้าใช้สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญชลา สุตาชาติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ ที่ประสาทวิชาความรู้ ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาในการทำงานวิจัยและให้ความช่วยเหลือที่ดีตลอดมา รวมทั้งช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณทุนวิจัยแห่งชาติ (วช) ที่ได้สนับสนุนเงินทุนที่ใช้ในการดำเนินงานตลอดทั้งการทำงานวิจัย ช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด และบริษัท ช.จิตรพล จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุในการทำวิจัย รวมทั้งข้อมูลที่เป็นต่องานวิจัยและคำแนะนำต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษา ให้กำลังใจเป็นอย่างดี ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดี จนกระทั่งงานวิจัยนี้เกิดผลสำเร็จ

ศศิประภา ศรีไชโย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ท
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย	3
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย.....	4
1.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
2 ทฤษฎีและและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ.....	6
2.2 คอนกรีตมวลเบา.....	6
2.3 มวลรวม.....	9
2.4 ส่วนประกอบของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์	10
2.4.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	10
2.4.2 น้ำ.....	11
2.4.3 ทราย.....	12
2.4.4 เมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์.....	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.5 สารเพิ่มฟอง.....	15
2.5 โครงสร้างของคอนกรีตมวลเบา.....	16
2.6 การออกแบบการทดลอง.....	17
2.6.1 หลักการพื้นฐาน.....	17
2.6.2 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	17
2.6.3 การออกแบบการทดลองแบบ 2 ^k แฟคทอเรียล.....	18
2.7 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
2.8 สรุป.....	30
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 บทนำ.....	33
3.2 วัสดุ.....	35
3.2.1 ปูนซีเมนต์.....	35
3.2.2 ทราย.....	36
3.2.3 น้ำ.....	37
3.2.4 เศษเมลามีน.....	37
3.2.5 สารเพิ่มฟอง.....	39
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	40
3.3.1 เครื่องบดพลาสติก.....	40
3.3.2 เครื่องเขย่าตะแกรงร้อน.....	40
3.3.3 เครื่องผสม.....	41
3.3.4 เครื่องสร้างโฟมและเครื่องอัดอากาศ.....	41
3.3.5 เครื่องชั่งน้ำหนักและภาชนะที่ทราบปริมาตร.....	41
3.3.6 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	43
3.3.7 เตาอบลมร้อน.....	43
3.3.8 เครื่องทดสอบการนำความร้อน.....	43
3.3.9 แบบหล่อมาตรฐาน.....	42
3.4 การทดสอบสมบัติของวัสดุ.....	44

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.1	การวิเคราะห์ขนาดคละ	44
3.4.2	การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ.....	46
3.4.3	การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุ.....	47
3.5	การขึ้นรูปขึ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	49
3.5.1	การออกแบบส่วนผสม	49
3.5.2	การเตรียมเศษเมลามีน	49
3.5.3	การเตรียมโฟม.....	50
3.5.4	การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ	51
3.5.5	การบ่มขึ้นทดสอบ.....	52
3.6	การทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์.....	53
3.6.1	การทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	53
3.6.2	การทดสอบการดูดซึมน้ำ	53
3.6.3	การทดสอบการนำความร้อน	54
3.6.4	การทดสอบความพรุน.....	55
3.7	การวิเคราะห์ระดับจุลภาค	58
3.7.1	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	58
3.7.2	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	58
3.8	การวิเคราะห์การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ³ แฟกทอเรียล	59
3.9	สรุป.....	60
4	ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
4.1	บทนำ.....	61
4.2	สมบัติของปูนซีเมนต์และมวลรวมละเอียด	62
4.3	ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นต่อสมบัติ เชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	64
4.3.1	ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	64
4.3.2	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	66

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.3	การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์.....	72
4.3.4	การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	74
4.3.5	อัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฟูนที่ส่งผลที่ดีต่อสมบัติเชิงกล ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์.....	75
4.4	ผลการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบสารเพิ่มฟองสองยี่ห้อ	76
4.4.1	การเปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	76
4.4.2	การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	78
4.4.3	ผลวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดด้วยเทคนิคการออกแบบ การทดลองเชิงแฟกทอเรียล.....	82
4.4.4	การเปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์.....	90
4.4.5	ผลวิเคราะห์การดูดซึมน้ำด้วยเทคนิคการออกแบบ การทดลองเชิงแฟกทอเรียล.....	92
4.4.6	การเปรียบเทียบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์.....	98
4.4.7	ผลวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดด้วยเทคนิคการออกแบบ การทดลองเชิงแฟกทอเรียล.....	100
4.4.8	สรุปผลการเปรียบเทียบสารเพิ่มฟอง	103
5	สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1	สรุป.....	104
5.1.1	อิทธิพลของอัตราส่วนผสมระหว่างเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฟูน ในการแทนที่ทรายในคอนกรีตมวลเบา	104
5.1.2	ผลการเปรียบเทียบสารเพิ่มฟอง	105
5.2	ข้อเสนอแนะ	105
	รายการอ้างอิง	107
	ภาคผนวก	112
	ภาคผนวก ก ผลการทดลอง.....	112
	ภาคผนวก ข บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	122
	ประวัติผู้เขียน	131

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	คอนกรีตมวลเบาแบ่งตามลักษณะการใช้งาน..... 7
2.2	คุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 12
2.3	คุณสมบัติทางกายภาพของเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ 14
2.4	แผนการทดลองแบบ 2^2 แฟกทอเรียล..... 19
2.5	contrast coefficients ของการออกแบบการทดลองแบบ 2^2 แฟกทอเรียล 20
2.6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการออกแบบการทดลองแบบ 2^2 แฟกทอเรียล..... 21
2.7	การแทนที่มวลรวมด้วยพลาสติกในคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ 30
2.8	สมบัติทางกลของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์จากรายงานของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 31
3.1	การวิเคราะห์ขนาดผลของตัวอย่างด้วยตะแกรงร่อน 46
3.2	การเก็บข้อมูลในการคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของ มวลรวมละเอียด 48
3.3	สัดส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ โดยน้ำหนัก 50
3.4	ปัจจัยและระดับปัจจัย 59
4.1	สมบัติทางกายภาพของมวลรวมละเอียด 61
4.2	ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยของคอนกรีตมวลเบาผสมเมลามีน..... 82
4.3	ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลของการทดสอบกำลังรับแรงอัด ของคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีน 83
4.4	ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา..... 86
4.5	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา..... 86
4.6	ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลของการทดสอบการดูดซึมน้ำ ของคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีน 93
4.7	ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา 96

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.8 ผลการวิเคราะห์แปรปรวนของปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2 ³ แฟกทอเรียล ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา.....	96
4.9 ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลของการทดสอบการนำความร้อน ของคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีน	101
4.10 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2 ³ แฟกทอเรียล ในการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา.....	101
4.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2 ³ แฟกทอเรียล ในการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา.....	102
ก.1 การดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนแบบฝุ่น.....	113
ก.2 ตัวอย่างที่ 1 ทราย.....	113
ก.3 ตัวอย่างที่ 2 เศษเมลามีนแบบเม็ด	114
ก.4 ตัวอย่างที่ 3 เศษเมลามีนแบบฝุ่น.....	114
ก.5 ตัวอย่างที่ 4 ทราย+เศษเมลามีนแบบฝุ่น.....	115
ก.6 ตัวอย่างที่ 5 ทราย+เศษเมลามีน 50:50.....	115
ก.7 ตัวอย่างที่ 6 ทราย+เศษเมลามีน 75:25.....	116
ก.8 ตัวอย่างที่ 7 ทราย+เศษเมลามีน 85:15.....	116
ก.9 ตัวอย่างที่ 8 ทราย+เศษเมลามีน 90:10.....	117
ก.10 ตัวอย่างที่ 9 ทราย+เศษเมลามีนแบบฝุ่น.....	117
ก.11 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	118
ก.12 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	119
ก.13 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์.....	120
ก.14 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์.....	121

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การก่อตัวของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์.....	13
2.2	โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์.....	16
2.3	ทริทเมนต์คอมบิเนชันของแผนการทดลองแบบ 2 ² แฟกทอเรียล.....	18
3.1	แผนการดำเนินงานวิจัย.....	34
3.2	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เอสซีจี ไฮบริด.....	35
3.3	ภาพขยายของปูนซีเมนต์ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	35
3.4	ภาพขยายของทรายด้วย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	36
3.5	ทรายที่อยู่ในสภาพอิมตัวผิวแห้ง และสภาพเปียก.....	36
3.6	ลักษณะเศษเมลามีนแบบเม็ด.....	37
3.7	ภาพขยายของเศษเมลามีนแบบเม็ดด้วย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	38
3.8	ลักษณะเศษเมลามีนแบบฝุ่น.....	38
3.9	ภาพขยายของเศษเมลามีนแบบฝุ่นด้วย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	39
3.10	สารเพิ่มฟอง.....	39
3.11	เครื่องบดพลาสติก.....	40
3.12	เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน.....	40
3.13	เครื่องผสม.....	41
3.14	เครื่องอัดอากาศและเครื่องสร้างฟองโฟม.....	42
3.15	เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	42
3.16	เตาอบลมร้อน.....	42
3.17	เครื่องทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีต.....	43
3.18	แบบหล่อมาตรฐาน.....	44
3.19	ขนาดกะของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C33.....	45
3.20	การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด.....	48
3.21	รูปแบบเศษเมลามีน.....	49
3.22	การเตรียมโฟมแบบ Pre-formed foam method ผสมในคอนกรีตมวลเบา.....	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.23	การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ 52
3.24	การบ่มขึ้นทดสอบด้วยพลาสติกแรพ 52
3.25	การดูดซับแก๊สไนโตรเจนทั้งบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ 55
3.26	การดูดซับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนของวัสดุเป็นหลายชั้น 55
3.27	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) 57
3.28	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) 58
4.1	ผล TGA ของเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่น 63
4.2	การรวมกันของมวลรวมละเอียด (ทราย เศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่น) 64
4.3	ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³ 65
4.4	ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m ³ 65
4.5	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³ 67
4.6	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m ³ ที่ 67
4.7	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³ อายุบ่ม 28 และ 60 วัน 68
4.8	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m ³ ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน 68
4.9	ภาพขยายของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³ ด้วยกล้อง SEM ที่ กำลังขยาย 1,000 เท่า 70
4.10	ภาพขยายของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³ ด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่า (G = เศษเมลามีนแบบเม็ด) 71

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³	73
4.12 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m ³	73
4.13 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³	75
4.14 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m ³	75
4.15 เปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ที่ใช้สารเพิ่มฟองสองยี่ห้อที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³	77
4.16 เปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ที่ใช้สารเพิ่มฟองสองยี่ห้อที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m ³	77
4.17 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ที่ใช้สารเพิ่มฟองสองยี่ห้อที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³	79
4.18 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ที่ใช้สารเพิ่มฟองสองยี่ห้อที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m ³	79
4.19 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ที่ใช้สารเพิ่มฟองสองยี่ห้อที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³ อายุ 28 และ 60 วัน.....	80
4.20 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ที่ใช้สารเพิ่มฟองสองยี่ห้อที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m ³ อายุ 28 และ 60 วัน.....	80
4.21 การเปรียบเทียบภาพถ่ายของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟอง สองยี่ห้อที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m ³ ที่กำลังขยาย 10 เท่า.....	81
4.22 รูปแบบแผนการออกแบบการทดลอง 2 ³ แฟกทอเรียล ของการทดสอบ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา.....	84
4.23 Residual plot ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา	85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24	ความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าประมาณของอิทธิพลทั้งหมด ของการทดสอบกำลังรับแรงอัด..... 87
4.25	อิทธิพลหลักของปัจจัยต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา..... 88
4.26	อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างสองปัจจัยต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา 88
4.27	เปรียบเทียบค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ที่ใช้สารเพิ่มฟองสองยี่ห้อที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ 91
4.28	เปรียบเทียบค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ที่ใช้สารเพิ่มฟองสองยี่ห้อที่ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ 91
4.29	ปริมาตรรูพรุนรวมของวัสดุมวลรวมละเอียดและคอนกรีตมวลเบา ที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ 92
4.30	รูปแบบแผนการออกแบบการทดลอง 2^3 แฟกทอเรียล ของการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา 94
4.31	Residual plot ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา..... 95
4.32	ความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าประมาณของอิทธิพลทั้งหมด ของการทดสอบการดูดซึมน้ำ..... 97
4.33	อิทธิพลหลักของปัจจัยต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา 97
4.34	อิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัยต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา..... 98
4.35	เปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ที่ใช้สารเพิ่มฟองสองยี่ห้อที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ 99
4.36	เปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ที่ใช้สารเพิ่มฟองสองยี่ห้อที่ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ 99
4.37	ความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าประมาณของอิทธิพลทั้งหมด ของการทดสอบการนำความร้อน..... 102

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

α	= significant level
ANOVA	= analysis of variance
ASTM	= American society for testing and materials
β	= สัมประสิทธิ์การถดถอย
BET	= brunauer-emmett-teller
CaCN_2	= แคลเซียมไซยาไนด์
CaO	= แคลเซียมออกไซด์
Ca(OH)_2	= แคลเซียมไฮดรอกไซด์
C_3A	= ไตรแคลเซียมอลูมิเนต
C_4AF	= เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์
$\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$	= เมลามีน
CH_2O	= ฟอรัมาลดีไฮด์
C_2S	= ไดแคลเซียมซิลิเกต
C_3S	= ไตรแคลเซียมซิลิเกต
DOE	= design of experiment
EPS	= โพลีสไตรีน
EVA	= โพลีไวนิลอะซิเตท
HDPE	= โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง
kg/m^3	= kilogram per cubic meter
LDPE	= โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
MF	= melamine formaldehyde
MFG	= melamine formaldehyde waste granule
MFP	= melamine formaldehyde waste powder
MFGP	= melamine formaldehyde waste granule and powder
MPa	= mega Pascal ($1 \text{ MPa} = \times 10^6 \text{ N/m}^2$)
MS	= mean squares
OM	= optical microscope

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

OPC	= ordinary portland cement
PC	= พอลิคาร์บอเนต
PET	= polyethylene terephthalate
R_{adj}^2	= adjusted coefficient of determination
PUF	= พอลิยูรีเทนฟอร์มัลดีไฮด์
PVC	= พอลิไวนิลคลอไรด์
SEM	= scanning electron microscope
S_g	= ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ
SiO ₂	= ซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกา
SS	= sum of squares
SS _T	= total sum of squares
SSD	= saturate surface
μm	= micrometer หรือ micron (1 micron = 1×10 ⁻⁶ m)
W	= watt
w/c	= water-to-cement ratio
W/m.°C	= watt per meter–Degree Celsius
W/m. K	= watt per meter–Kelvin
W_a	= การดูดซึมน้ำ
W_d	= น้ำหนักของชั้นทดสอบเมื่อแห้ง
W_w	= น้ำหนักของชั้นทดสอบเมื่อเปียก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกให้ความสำคัญกับการแก้ไขปัญหาขยะมากขึ้น เนื่องจากขยะเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนและทำลายสิ่งแวดล้อมส่งผลให้ระบบนิเวศน์เปลี่ยนแปลงไป เมื่อประชากรโลกมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นทุกวันที่เท่ากับปริมาณขยะจะเพิ่มปริมาณมากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากมนุษย์มีความต้องการปัจจัยและเทคโนโลยีใหม่ ๆ เพื่อใช้ในการดำเนินชีวิต วิกฤตการณ์ปัญหาขยะทั่วโลกยังคงเป็นปัญหาที่ต้องหาแนวทางแก้ไขอย่างไม่จบสิ้น ข้อมูลรายงานจากกรมควบคุมมลพิษของประเทศไทยสรุปสถานการณ์ขยะในประเทศไทยปี 2558 ขยะที่พบมากที่สุดคือขยะมูลฝอยประมาณ 26.85 ล้านตัน มีปริมาณเพิ่มขึ้นจากปี 2557 (ปี 2557 มีปริมาณขยะมูลฝอย 26.19 ล้านตัน) และกากอุตสาหกรรมเกิดขึ้นทั่วประเทศ 37.4 ล้านตัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) วิธีการจัดการขยะมูลฝอยโดยเฉพาะขยะจำพวกพลาสติก ซึ่งวิธีกำจัดที่นิยมใช้มาช้านานและถูกต้องตามหลักการทางวิชาการคือ การเผาในเตาเผาและการฝังกลบ สำหรับวิธีการเผาในเตาเผาขยะสามารถกำจัดขยะมูลฝอยได้หลายชนิด และกำจัดได้ปริมาณมาก แต่มีข้อเสียคือเตาเผามีราคาสูง และอาจเกิดปัญหามลพิษทางอากาศได้ วิธีการฝังกลบเป็นการกำจัดขยะโดยการฝังลงในหลุมหรือบ่อ ซึ่งต้องมีการควบคุมตามมาตรการการดูแล เพื่อไม่ให้ส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อมและสุขภาพของประชาชน โดยรอบบริเวณหลุม ข้อเสียของวิธีนี้คือใช้เวลานานในการกำจัดโดยเฉพาะขยะพลาสติก (สุทธิรักษ์ สุจริตตานนท์, 2534) ดังนั้นการรีไซเคิลจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่สามารถกำจัดขยะพลาสติกได้ และเป็นวิธีที่มีประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด

พลาสติกที่นิยมนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมพลาสติก พลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ประเภทแรกคือเทอร์โมพลาสติก ขยะจากพลาสติกชนิดนี้สามารถหลอมและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ตัวอย่างการใช้งานเทอร์โมพลาสติก ได้แก่ พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตส่วนประกอบของรถยนต์ พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) ใช้ผลิตถุงพลาสติกใส่ของร้อน ถึงขยะ พอลิเอไมด์ (Polyamide) หรือ ไนลอน (Nylon) ใช้ผลิตเสื้อผ้า พอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) ใช้ผลิตขวดน้ำ เป็นต้น และพลาสติกประเภทที่สองคือพลาสติกเทอร์โมเซตติง พลาสติกชนิดนี้ไม่สามารถหลอมและนำมาขึ้นรูปใหม่ได้ เนื่องจากกรรมวิธีการผลิตที่ให้ความร้อนและความดันแก่พอลิเมอร์ทำให้เกิดสายโซ่โมเลกุลที่เชื่อม โยงกัน (Cross-linked) เป็นร่างแหยึดกันอย่างแข็งแรงคงรูป ตัวอย่างการใช้งานพลาสติกเทอร์โมเซตติง ได้แก่ พอลิยูรีเทน

(Polyurethane, PU) ใช้ผลิตโฟม เมลามีน-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (Melamine-formaldehyde resin) ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน เช่น จาน ชาม ซ้อน เป็นต้น (Hasan S. Dweik, Mohamed M. Ziara and Mohamed S. Hadidoun, 2008)

เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์นิยมใช้ผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ในครัวเรือน ผลิตภัณฑ์บรรจุอาหาร ด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปร้อน ในระหว่างกระบวนการผลิตเครื่องใช้ในครัวเรือนเกิดของเสียที่เรียกว่า เศษครีปที่มีปริมาณมากถึง 1 ตันต่อวัน นอกจากนี้ยังมีกระบวนการตกแต่งผิวด้วยการขัดผิว ผลิตภัณฑ์ทำให้เกิดฝุ่นผงเมลามีน ของเสียเมลามีนเหล่านี้ไม่สามารถหลอมนำกลับไปใช้ใหม่ได้ ดังนั้นจึงต้องทำลายด้วยวิธีการเผาหรือฝังกลบที่ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อต้นทุนการผลิต วิธีการจัดขยะด้วยการรีไซเคิลสามารถกำจัดเศษเมลามีนโดยไม่เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งถือเป็นประโยชน์อย่างมาก (Somsak Siwadamrongpong and Janjira Aphirakmethawong, 2015)

แนวทางในการรีไซเคิลพลาสติกที่น่าสนใจอีกวิธีหนึ่งคือ การรีไซเคิลด้วยซีเมนต์ (Cementation) เป็นการนำซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสานกับวัสดุอื่น ๆ เช่น ทราช หิน เป็นต้น ซีเมนต์จะแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาค และเมื่อซีเมนต์ได้รับน้ำจะทำให้เริ่มเกาะตัว และติดแน่นกับอนุภาคนั้น ๆ จนแข็งตัว การรีไซเคิลด้วยวิธีนี้มีนักวิจัยหลายท่านให้ความสนใจและทดลองนำพลาสติกมารีไซเคิลด้วยซีเมนต์ ตัวอย่างเช่นการนำเศษขวดพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลต (PET) ใช้เป็นมวลรวมในคอนกรีต ซึ่งทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบา แต่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเช่นกัน พลาสติกที่ถูกผสมเข้าไปในคอนกรีตอาจส่งผลทั้งในทางบวกเช่นคอนกรีตมีน้ำหนักเบา หรือในทางลบเช่นความแข็งแรงลดลง เป็นต้น พลาสติกเมลามีนจึงเป็นที่น่าสนใจและถูกนำมาศึกษาโดยการทำเป็นวัสดุผสมแบบใหม่ การใช้เศษเมลามีนในคอนกรีตนั้นสามารถกำจัดของเสีย และช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดได้ (Albano, C., Camacho, N., Hernandez, M., Matheus, A. and Gutierrez, A., 2009)

คอนกรีตมวลเบาเซตลูสาร์เป็นนวัตกรรมใหม่ที่นำฟองโฟมที่สร้างจากวิธีเชิงกลมาผสมกับซีเมนต์เพสต์ทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากในเนื้อคอนกรีต คอนกรีตจึงมีคุณสมบัติเด่นในเรื่องน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงและสามารถทนความร้อนได้ดีกว่าคอนกรีตทั่วไป คอนกรีตที่มีน้ำหนักเบาสามารถลดน้ำหนักของโครงสร้างได้ (Khamphree J., Theerawat S. and Prinya C., 2011)

จากงานวิจัยของ Chalermchai Chaitongrat and Somsak Siwadamrongpong, (2015) ศึกษาการใช้เศษเมลามีนเป็นมวลรวมในคอนกรีตมวลเบา พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำเศษเมลามีนมาใช้ในคอนกรีตมวลเบา ทั้งยังส่งผลดีต่อความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งเศษเมลามีนแบบฝุ่นให้ความแข็งแรงมากกว่าเศษเมลามีนแบบเม็ด (ได้จากการบดเศษครีป) ในทางกลับกันเศษเมลามีนแบบเม็ดมีปริมาณมากกว่าเศษเมลามีนแบบฝุ่น เนื่องจากทุกครั้งที่มีการขึ้นรูปเมลามีนด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน เมลามีนจะถูกอัดเต็มแม่แบบและมีส่วนที่ล้นออกมานอกแม่แบบ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์

ที่สมบูรณ์ เรียกว่าเศษครีบ จึงทำให้เศษเมลามีนแบบเม็ดมีปริมาณมาก ดังนั้นหากสามารถกำจัดเศษครีบให้มากขึ้นพร้อมกับกำจัดเศษฝุ่นก็จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดลงอีก งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการรีไซเคิลเศษเมลามีนทั้งแบบเศษเม็ดและแบบฝุ่นรวมกันและศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนผสมระหว่างเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนจากการใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 แทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก

1.3.2 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1

1.3.3 ควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเท่ากับ 1,100 และ 1,300 kg/m³

1.3.4 สารเพิ่มฟองที่ใช้แตกต่างกัน 2 แบบคือ สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และ สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ ยี่ห้อ Tripple tree

1.3.5 ศึกษาที่อายุบ่ม 7, 14, 28 และ 60 วัน

1.3.6 ทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา

1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

1.4.1 ศึกษาข้อมูล ปรัชญาวัฒนธรรม งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 กำหนดขอบเขตการทดลองและแผนการดำเนินงานวิจัย

1.4.3 ออกแบบวิธีการทดลอง โดยใช้ (Design of experiment, DOE)

1.4.4 เตรียมอุปกรณ์และวัสดุทดสอบ

ทำการบดเศษครีบเมลามีนให้เป็นแบบเม็ด และคัดกรองสิ่งสกปรกในเศษเมลามีนแบบฝุ่น โดยใช้ตะแกรงร่อน พร้อมทั้งคัดขนาดส่วนกละที่เหมาะสมตามมาตรฐาน เพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียด

1.4.5 เตรียมขึ้นทดสอบโดยการผสมส่วนผสมตามแผนการออกแบบการทดลอง

1.4.6 หล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่ผสมเศษเมลามีน

- ขนาด 50 mm x 50 mm x 50 mm สำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกล
- ขนาด 100 mm x 100 mm x 100 mm สำหรับการทดสอบการดูดซึมน้ำ
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 69 mm สูง 75 mm สำหรับการทดสอบสมบัติความร้อน

1.4.7 การประเมินผล

- ประเมินอัตราส่วนผสมเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่นที่มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา

- ประเมินกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก. เลขที่ 2601-2556)

- ประเมินการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเศษเมลามีน

- ประเมินคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์

1.4.8 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.4.9 สรุปผลการทดลอง

1.4.10 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.4.11 เผยแพร่งานวิจัย

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

1.5.1 อาคารเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5.2 บริษัทศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน)

1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1.6.1 เครื่องมือสำหรับเตรียมวัสดุและขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

- เครื่องบดพลาสติก (Plastic recycling machinery) รุ่น DK-5953
- เครื่องร่อนแยกขนาด (Sieve shaker) ยี่ห้อ Retsch รุ่น AS200
- ชุดตะแกรงร่อน (Sieve) ตามมาตรฐาน ASTM E11
- เครื่องชั่งดิจิตอล
- แบบหล่อมาตรฐาน
- เครื่องผสม (Mixer) แบบไม่ผสมเอียง
- เครื่องสร้างโฟม (Foam generator)

- เครื่องอัดอากาศ (Air compressor)

1.6.2 เครื่องมือสำหรับทดสอบสมบัติคอนกรีตมวลเบา

- เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machines) รุ่น NRI-TS500-50

กำลังสูงสุด 50 kN สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

- เครื่องทดสอบการนำความร้อน

- เตาอบลมร้อน (Hot air oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น BE-200

1.6.3 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ระดับจุลภาค

- กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM)

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 เข้าใจถึงสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา เซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน

1.7.2 เข้าใจถึงสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนจากการใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์

1.7.3 สามารถรีไซเคิลเศษเมลามีนโดยประยุกต์ใช้ในคอนกรีตมวลเบา

1.7.4 สามารถลดการใช้วัสดุธรรมชาติ (ทราย) ในการผลิตคอนกรีตมวลเบา

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

อุตสาหกรรมก่อสร้างมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น เป็นผลมาจากโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ของรัฐบาลหรือธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ที่กำลังเติบโตมากยิ่งขึ้น วัสดุก่อสร้างอย่างคอนกรีตมวลเบาหรืออิฐมวลเบา ได้รับความนิยมนำมาใช้มากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากคุณสมบัติเด่นในเรื่องของน้ำหนักเบาที่สามารถช่วยลดน้ำหนักโครงสร้างขนาดใหญ่ และประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง อีกทั้งยังสามารถป้องกันความร้อนได้ดีกว่าอิฐชนิดอื่น ทำให้อุตสาหกรรมคอนกรีตมวลเบา มีการขยายตัวสูง อันเนื่องมาจากความต้องการของธุรกิจก่อสร้าง

นักวิจัยหลายท่านให้ความสนใจศึกษาเรื่องการรีไซเคิลพลาสติกด้วยซีเมนต์ที่คาดหวังว่าจะสามารถกำจัดหรือทำลายขยะพลาสติกและอาจช่วยเพิ่มมูลค่าให้แก่ขยะพลาสติก ซึ่งงานวิจัยนี้ได้สังเกตเห็นถึงวิธีการกำจัดเศษเมลามีนที่เป็นของเสียในกระบวนการผลิต ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการทบทวนวรรณกรรมที่จำเป็นต่องานวิจัย

2.2 คอนกรีตมวลเบา (Lightweight concrete)

คอนกรีตมวลเบาเป็นคอนกรีตที่มีความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป (เปรียบเทียบที่ขนาดเท่ากัน) คอนกรีตทั่วไปจะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2,200 - 2,600 kg/m³ แต่คอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นในช่วง 400 - 1,800 kg/m³ มักใช้เป็นวัสดุก่อผนังเหมาะสำหรับงานที่รับน้ำหนักหรือต้องการกำลังรับแรงอัดไม่มาก นิยมใช้ในงาน โครงสร้างขนาดใหญ่และอาคารสูงเพื่อลดขนาดของโครงสร้าง คอนกรีตมวลเบาสามารถแบ่งตามวัสดุผสมเป็น 3 ประเภทดังนี้

1) คอนกรีตที่ใช้มวลรวมน้ำหนักเบา (Lightweight aggregate concrete) มวลรวมน้ำหนักเบาถูกนำมาเป็นวัสดุผสมแทนที่มวลรวมปกติ มวลรวมเบาจะมีความพรุนและมีความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่ามวลรวมปกติ แบ่งออกเป็น 4 ชนิดคือ

- มวลรวมเบาที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ หินเวอร์มิคูไลท์ (vermiculite) เพอร์ไลต์ (Perlite) เกิดจากการสลายตัวของหินภูเขาไฟ หินพัมมิส (Pumice)

- มวลรวมเบาที่ได้จากกระบวนการผลิต ได้แก่ ดินเหนียวผสมสารก่อฟองอากาศ (Expanded clay aggregate)

- มวลรวมเบาที่ได้จากสารอินทรีย์ ได้แก่ ไม้ แกลบ ชานอ้อย
- มวลรวมเบาที่ได้จากของเหลือจากกระบวนการผลิต ได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน

2) คอนกรีตมวลเบาที่เกิดจากการเติมฟองอากาศ (Aerated concrete) การเติมฟองอากาศจะเกิดโพรงอากาศหรือช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต ฟองอากาศนี้ขนาดเล็กมาก (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1-1.0 mm) กระจายอย่างสม่ำเสมอและไม่สลายตัวในเนื้อคอนกรีต ซึ่งเรียกว่าการกักกระจายของอากาศ (Air entrainment) วิธีการผลิตฟองอากาศมี 3 วิธี

-วิธีแรกคือการผสมสารกักกระจายฟองอากาศ (Air-entrained foam) ที่ทำให้เกิดโฟม (Foaming mixture) สารชนิดนี้เป็นสารอินทรีย์ที่ทำปฏิกิริยาบนผิวก่อให้เกิดฟองอากาศเล็ก ๆ

- วิธีสองจะอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้เกิดฟองอากาศ (Chemical aerating) อาจเรียกคอนกรีตประเภทนี้ว่า “Gas aerated concrete” ตัวอย่างเช่นการเติมผงอลูมิเนียม (Aluminum powder) ที่ทำปฏิกิริยาเกิดการพองตัวฟูขึ้น

- วิธีที่สามคือการสร้างฟองอากาศก่อนแล้วนำไปผสมกับซีเมนต์เพสต์ วิธีนี้เรียกว่า Pre formed foam เช่น การใช้เครื่องสร้างฟองโฟมจากสารเพิ่มฟอง (Foaming agent) อาจเรียกคอนกรีตประเภทนี้ว่า “Foam aerated concrete” หรือ “Cellular lightweight concrete”

3) คอนกรีตไม่มีมวลรวมละเอียด (No-fine aggregate concrete) ไม่มีส่วนผสมของมวลรวมละเอียด จึงมีเพียงมวลรวมหยาบที่มีขนาดใกล้เคียงกันขนาดเดียว (Single size) ดังนั้นจึงมีช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบแต่ละอนุภาคอยู่มากเรียกว่าคอนกรีตพรุน (Porous concrete) ตัวอย่างมวลรวมหยาบ ได้แก่ กรวด หินบด (อภิย ชาติธรรม, 2557)

นอกจากนี้คอนกรีตมวลเบายังสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คอนกรีตมวลเบาแบ่งตามลักษณะการใช้งาน (ACI 211.2 - 18)

ประเภทของคอนกรีต	หน่วยน้ำหนัก (kg/m ³)	กำลังรับแรงอัด (kg/cm ²)
คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานฉนวนความร้อน (Insulating lightweight concrete)	< 800	10-100
คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานก่อฉาบ (Masonry lightweight concrete)	500-800	100-180
คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง (Structural lightweight concrete)	1,400-1,800	180-400

งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ (Cellular Lightweight Concrete, CLC) ซึ่งเป็นคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศโดยการสร้างฟองอากาศจากสารเพิ่มฟองผสมกับซีเมนต์เพสต์ ส่วนประกอบหลักคือซีเมนต์ ทราย น้ำ และฟองอากาศ ซึ่งไม่มีการเติมมวลรวมหยาบลงไปในเรื่องเนื้อคอนกรีต คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ดีกว่าคอนกรีตทั่วไปในเรื่องน้ำหนักเบา แข็งแรง อัตราการดูดซึมน้ำต่ำมาก เป็นฉนวนกันความร้อน สามารถก่อสร้างได้สะดวกรวดเร็วทำให้ประหยัดเวลาและค่าแรงงาน แต่ก็ยังมีข้อด้อยในเรื่องราคาที่สูงกว่า

การบ่มคอนกรีต (Concrete curing) เป็นการควบคุมและป้องกันไม่ให้น้ำภายในคอนกรีตระเหยออกเร็วเกินไป เนื่องจากคอนกรีตต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์อย่างสมบูรณ์ที่เรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยตรง จึงจำเป็นต้องบ่มคอนกรีตให้มีความชื้นอยู่เสมอ (อย่างน้อย 7 วัน) กำลังรับแรงอัดจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเท่าที่ที่มีความชื้นพอให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยาได้ วิธีการบ่มคอนกรีตสามารถแบ่งออกได้ 3 วิธีดังนี้

1. การบ่มโดยการเพิ่มความชื้น เป็นการเพิ่มความชื้นให้กับผิวคอนกรีตโดยตรง เพื่อทดแทนน้ำที่ระเหยออกจากคอนกรีต ตัวอย่างการบ่มวิธีนี้ได้แก่

- การขังน้ำ เป็นการใช้ดินเหนียวหรืออิฐกั้นที่สามารถกั้นโดยรอบงานคอนกรีตที่จะบ่มไม่ให้น้ำไหลออกไป เหมาะสำหรับงานแนวระดับ เช่น พื้นหรือถนน ข้อดีของการบ่มประเภทนี้คือทำงานง่าย สะดวก ราคาถูก วัสดุหาได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือต้องทำความสะอาดผิวหน้าคอนกรีตบริเวณที่บ่มและมีข้อควรระวังคือไม่ให้ที่กั้นพัง

- การฉีดหรือพรมน้ำ เหมาะสำหรับงานแนวตั้งหรือแนวราบอย่างเช่น ผนัง กำแพง และพื้น ข้อดีคือทำได้สะดวก ได้ผลดี ค่าใช้จ่ายถูก ไม่ต้องดูแลตลอดเวลา แต่มีข้อเสียคือไม่เหมาะกับสถานที่ที่หาน้ำได้ยาก เนื่องจากสิ้นเปลืองน้ำมาก มีข้อควรระวังคือต้องฉีดน้ำให้ทั่วทุกส่วนของคอนกรีต

- การคลุมด้วยวัสดุเปียกชื้น เป็นวิธีที่นิยมใช้มาก วัสดุที่ใช้คลุมเช่น ผ้าใบ กระสอบ หรือวัสดุที่อุ้มน้ำ สามารถใช้ได้กับงานทั้งแนวระดับ แนวตั้ง และแนวเอียง ข้อดีคือได้ผลดีมาก ค่าใช้จ่ายถูก วัสดุหาง่าย ข้อเสียคือต้องรักษาให้น้ำชุ่มอยู่เสมอ ไม่เหมาะกับงานที่มีพื้นที่กว้าง เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น

2. การบ่มโดยการป้องกันการสูญเสียน้ำของเนื้อคอนกรีต เป็นการปิดผิวของคอนกรีตไม่ให้ความชื้นระเหยออกจากเนื้อคอนกรีต วิธีการบ่มได้แก่

- การบ่มด้วยกระดาษกั้นน้ำซึม เป็นการปิดผิวคอนกรีตด้วยกระดาษกั้นน้ำซึมอย่างน้อย 3 วัน นิยมใช้กับงานคอนกรีตแนวระดับ กระดาษต้องมีคุณสมบัติเหนียว ไม่ยืดหดตัวในขณะเปียกและแห้ง รอยต่อระหว่างแผ่นอาจยึดกันด้วยกาวประเภทยางมะตอย ข้อควรระวังคือบริเวณรอยต่อที่ต้องติดแน่นและกระดาษต้องไม่เกิดการชำรุด ข้อดีคือ สะดวก รวดเร็ว ป้องกันคอนกรีต

ไม่ให้แห้งเร็ว แต่มีข้อเสียคือราคาแพง ไม่สะดวกในการปฏิบัติงานและการเก็บรักษาเพื่อนำมาใช้ในครั้งถัดไป

- การบ่มโดยใช้แบบหล่อไม้เปียกและแบบหล่อเหล็ก เป็นการปล่อยคอนกรีตไว้ในแบบหล่อให้นานที่สุด สามารถช่วยป้องกันการสูญเสียความชื้นได้ดี เหมาะกับงานเช่นการหล่อเสาคาน ข้อดีคือทำงานได้สะดวก แต่มีข้อเสียคือต้องใช้ไม้เพื่อมาทำแบบหล่อเป็นจำนวนมาก

- การบ่มโดยใช้สารเคมีเคลือบผิวคอนกรีต เหมาะสำหรับงานที่ต้องการใช้งานอย่างเร่งรีบ อาทิเช่น ดึงสูงที่ลำเลียงน้ำหรืออุปกรณ์บ่มขึ้นไปได้ลำบาก การใช้สารเคมีไปคลุมผิวเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำภายในเนื้อคอนกรีต มีความสะดวกและรวดเร็ว แต่มีค่าใช้จ่ายที่สูง ข้อควรทราบคือสารเคมีต้องพ่นในขณะที่ผิวคอนกรีตยังชื้นอยู่และสารเคมีนี้ไม่เหมาะกับการต่อเติมงานคอนกรีตหรืองานฉาบ เพราะจะทำให้การยึดกันระหว่างคอนกรีตต่อเติมกับคอนกรีตเดิมไม่ดี

- การบ่มโดยใช้แผ่นพลาสติก เป็นการใช้แผ่นพลาสติกปิดคลุมคอนกรีตป้องกันการระเหยของน้ำ แผ่นพลาสติกมีน้ำหนักเบา ทำงานง่าย ได้ผลดี ไม่ต้องรดน้ำเพื่อรักษาความชื้น แต่มีข้อเสียในเรื่องความบางของแผ่นพลาสติกที่ซำหรือขาดง่าย น้ำหนักเบาต้องมีสิ่งของที่หนักวางทับ มีราคาสูงถ้าใช้กับงานที่มีความกว้าง

3. การบ่มด้วยการเร่งกำลัง เป็นการบ่มด้วยวิธีการอบไอน้ำ ที่ให้ความชื้นและความร้อนแก่คอนกรีตที่หล่อเสร็จใหม่ ช่วยเร่งปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นและลดการหดตัว ส่วนใหญ่จะใช้กับงานที่ทำจากปูนซีเมนต์ทุกประเภท นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมคอนกรีตสำเร็จรูป เช่น เสาไฟฟ้า พื้นสำเร็จรูป คอนกรีตบล็อก การบ่มโดยการอบไอน้ำมี 2 วิธีคือการอบไอน้ำที่มีความดันต่ำ และการอบไอน้ำที่มีความดันสูง (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2543)

2.3 มวลรวม (Aggregate)

มวลรวมคือวัสดุที่ใช้ผสมกับซีเมนต์เพสต์เพื่อผลิตเป็นคอนกรีต คอนกรีตทั่วไปมีมวลรวมเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 70 ถึง 80 ของปริมาณคอนกรีต ซึ่งมวลรวมที่นิยมใช้มากที่สุดคือทรายและหิน

ประเภทของมวลรวมแบ่งตามขนาดเม็ดของมวลรวมสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ดังนี้

1. มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) คือวัสดุที่ใช้ผสมกับซีเมนต์เพสต์เพื่อผลิตเป็นคอนกรีตที่มีขนาดเม็ดตั้งแต่ 4.75 mm ขึ้นไป มวลรวมหยาบที่นิยมใช้ได้แก่ หิน กรวด

2. มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) คือวัสดุที่ใช้ผสมกับซีเมนต์เพสต์เพื่อผลิตเป็นคอนกรีต ที่มีขนาดเม็ดตั้งแต่ 0.075 ถึง 4.75 mm มวลรวมละเอียดได้แก่ ทรายแม่น้ำ ทรายบก

การหาขนาดคละของมวลรวม ส่วนใหญ่จะใช้วิธีวิเคราะห์หาส่วนคละตามมาตรฐานอเมริกา (U.S. sieve) เป็นตะแกรงสำหรับคัดขนาดคละของทรายประกอบด้วยเบอร์ 4, 8, 16, 30, 50 และ 100 การวิเคราะห์หามวลรวมด้วยตะแกรงมาตรฐานจะสามารถหาค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) เป็นค่าที่แสดงความละเอียดของมวลรวม ถ้ามีค่าน้อยแสดงว่ามวลรวมมีความละเอียดมาก ซึ่งค่าโมดูลัสของทรายที่ใช้ในงานคอนกรีตที่เป็นมวลรวมละเอียดมีค่าประมาณ 2.20

2.4 ส่วนประกอบของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์

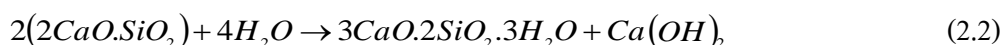
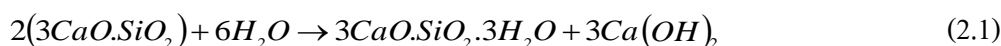
2.4.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งหรือปูนซีเมนต์ธรรมดา เป็นปูนมาตรฐานทั่วไปที่ใช้ในงานโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงสูง อาทิเช่น ถนน อาคารสูง และเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์คอนกรีต เช่น เสา คาน พื้น ฐานราก แต่ไม่ทนทานต่อปฏิกิริยาเคมีโดยเฉพาะซัลเฟต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน ASTM C150-12 และข้อกำหนดคุณภาพตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15 เล่ม 1-2555 ได้กำหนดมาตรฐานคุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 2.2 (บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด, 2557)

ซีเมนต์เป็นสารยึดประสานของแข็งให้ติดกัน ซึ่งอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำกับซีเมนต์ที่เรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ที่เกิดขึ้นในขณะผสมปูนซีเมนต์เพื่อใช้งาน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยสารประกอบพื้นฐาน 4 ชนิดคือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate) C_3S , ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate) C_2S , ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium aluminate) C_3A และเตตระแคลเซียมเฟอร์โรอะลูมิเนต (Tetracalcium ferro aluminate) C_4AF (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2556)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแต่ละสารประกอบพื้นฐานในปูนซีเมนต์มีดังนี้

1) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S)

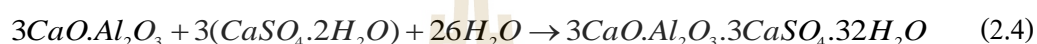
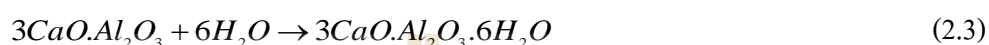


ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO.SiO_2$ หรือ C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต ($2CaO.SiO_2$ หรือ C_2S) ทั้งสองสารนี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$ หรือ CH) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$ หรือ CSH) ที่เป็นตัวยึดประสานส่วนผสมให้ติดกัน ดังแสดงในสมการที่ 2.1 และ 2.2 แคลเซียมซิลิเกตจะทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงมี C-S-H

ทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสานส่วนผสมให้ติดกัน

2) ปฏิกริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

$3CaO \cdot Al_2O_3$ หรือ C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็ว ทำให้ซีเมนต์เพสต์แข็งตัว ดังนั้นในการผลิตปูนซีเมนต์จึงมีการเติมยิปซัม $3(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$ เพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนตให้เกิดช้าลง เมื่อยิปซัมเข้าทำปฏิกิริยาจะทำให้เกิดชั้นเอททริงไคต์ (Ettringite) บนผิวของ C_3A ดังแสดงในสมการที่ 2.4



3) ปฏิกริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาของ C_4AF หรือ $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ และ ปฏิกิริยาของ C_3A มีความคล้ายคลึงกัน ยิปซัมจะหน่วงการเกิดปฏิกิริยาของ C_4AF มากกว่า C_3A ปฏิกิริยาระหว่าง C_4AF กับยิปซัมจะก่อให้เกิดแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต และแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรต์ ดังแสดงในสมการที่ 2.5



2.4.2 น้ำ (Water)

น้ำเป็นส่วนผสมที่สำคัญในคอนกรีต เนื่องจากน้ำถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันให้สมบูรณ์ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงคอนกรีต น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตเป็นน้ำประปาที่สะอาด ไม่มีสิ่งแปลกปลอมเจือปน ส่วนใหญ่ไม่ค่อยพบปัญหา เนื่องจากน้ำประปาที่ใช้ส่วนใหญ่มีคุณภาพที่ดี

การเตรียมฟองโฟมสำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์ลูลาร์ มีการใช้น้ำมาเจือจางสารเพิ่มฟองชนิดโปรตีน (Protein-based foaming agent) ก่อนนำเข้าเครื่องสร้างฟองโฟม น้ำที่ใช้ควรเป็นน้ำที่สะอาดและไม่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ เพราะอาจส่งผลต่อคุณภาพของโฟมได้

การกำหนดสัดส่วนของน้ำจะกำหนดเป็นอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ตามประเภทของปูนซีเมนต์หรือวัสดุยึดประสาน ซึ่งอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต้องมากเพียงพอสำหรับให้คอนกรีตทำงานได้ ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.4-0.8 ขึ้นอยู่กับความละเอียดของปูนซีเมนต์และมวลรวมที่ผสมเป็นคอนกรีต ถ้าหากกำหนดปริมาณน้ำไม่เพียงพอจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ไม่สมบูรณ์ (Khamphree J., Theerawat S. and Prinya C., 2011)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Item	Spec limit	ผลทดสอบปูนซีเมนต์
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	สูงสุด 6.0 %	1.15%
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃) เมื่อมีไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C ₃ A) ≤ 8 เมื่อมีไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C ₃ A) > 8	สูงสุด 3.0 % สูงสุด 3.5%	3.1%
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition)	สูงสุด 3.0 %	2.1%
กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue)	สูงสุด 0.75 %	0.23%
คุณสมบัติทางกายภาพ		
ปริมาณอากาศในมอร์ตาร์ (% Volume)	สูงสุด 12%	8%
ความละเอียด (Fineness) , พื้นผิวจำเพาะ (Specific surface) ทดสอบด้วยวิธีแอร์เพอร์มิเอบิลิตี (Air Permeability test) ค่าเฉลี่ย	ต่ำสุด 2, 800 cm ² /g	3,360 cm ² /g
วามอยู่ตัว (Soundness) การขยายตัวโดยวิธีออโตคลอว์ (Autoclave Expansion)	สูงสุด 0.80%	- 0.02
ระยะเวลาการก่อตัว (Time of Setting) ทดสอบแบบไวแคต (Vicat test) การก่อตัวระยะต้น (Initial set) การก่อตัวระยะปลาย (Final set)	ต่ำสุดที่ 45 นาที สูงสุดที่ 375 นาที	101 นาที 185 นาที
แรงอัด (Compressive strength) ก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์ (Mortar cubes) : 3 วัน 7 วัน	ต่ำสุด 12 MPa ต่ำสุด 19 MPa	24.3 MPa 32.1 MPa

หมายเหตุ: รายงานวิเคราะห์ผลทดสอบเมื่อวันที่ 7 พฤษภาคม 2557 (ปูนซีเมนต์ของบริษัทเอสซีจี)

2.4.3 ทราย (sand)

ทรายมีลักษณะอนุภาคเป็นแบบเม็ดกลม ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของหินชั้นเป็นเม็ดย่อย ๆ ละเอียด ทรายที่นิยมนำมาใช้ในงานก่อสร้างมี 2 ชนิดคือ

- 1) ทรายบก เกิดจากการแตกตัวของหินทรายปะปนอยู่ในดิน ซึ่งในพื้นที่ดินจะมีซากพืช ซากสัตว์ปนอยู่ในดิน ก่อนการใช้งานทรายบกจึงต้องทำความสะอาดแยกสิ่งปะปนออกไป
- 2) ทรายแม่น้ำ อยู่ในที่ราบลุ่มของแม่น้ำเป็นตะกอนทรายมาทับกระแสน้ำที่พัดนำ

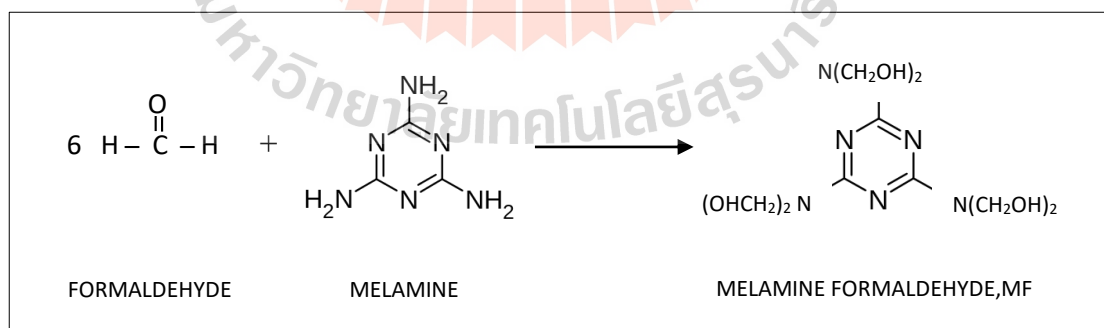
ทรายจากที่ต่าง ๆ มารวมกัน นิยมนำไปใช้ในงานก่อสร้างเนื่องจากเป็นทรายสะอาดเพราะผ่านการชะล้างด้วยน้ำมาแล้ว ทรายชนิดนี้มีลักษณะอนุภาคที่มีเหลี่ยมมีมุมขนาดต่าง ๆ กันจึงต้องมีการร่อนคัดขนาดก่อนนำไปใช้งาน

ทรายที่ใช้ในงานก่อสร้างส่วนใหญ่จะใช้ทรายที่มีขนาดที่ผ่านตะแกรงร่อน 4.75 mm มีรูปร่างเหลี่ยมคม มีความละเอียด ทรายจึงถูกจัดเป็นมวลรวมละเอียดที่มีขนาด 0.5-4.75 mm ขนาดของทรายแบ่งออกเป็น 3 แบบดังนี้

- ทรายละเอียด เป็นทรายที่มีขนาดเล็ก ละเอียดมาก มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5-1.5 mm นิยมนำมาใช้กับงานที่ไม่ต้องรับกำลังมาก เช่น งานก่อ งานฉาบ
- ทรายกลาง เป็นทรายที่มีขนาดเม็ดปานกลาง ละเอียดปานกลาง มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-3 mm นิยมนำมาใช้กับงานที่ต้องรับกำลัง เช่น งานก่ออิฐ พื้น คาน
- ทรายหยาบ เป็นทรายที่มีขนาดเม็ดใหญ่ ไม่ละเอียด มีเหลี่ยมคมมาก มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-4.75 mm นิยมนำมาใช้กับงานคอนกรีตที่ต้องการกำลังมาก เช่น งานรากฐาน งานเทพื้น

2.4.4 เมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ (Melamine formaldehyde)

เมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์เป็นพลาสติกที่นิยมนำมาใช้ผลิตเครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร อาทิ เช่น จาน ชาม ช้อน เป็นต้น นอกจากนี้ยังเป็นส่วนประกอบหลักในการผลิตแผ่นฟอรัไมกา แผ่นไม้เมลามีนปูพื้น เป็นต้น เมลามีนเป็นสารอินทรีย์มีสูตรทางเคมีคือ $C_3H_6N_6$ โครงสร้างทางเคมีของเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การก่อตัวของเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์

เมลามีนถูกค้นพบครั้งแรกโดยนักเคมีชื่อจัสติน วอน ลิบิก (Justin Von Liebig) เป็นชาวเยอรมัน ซึ่งในปี 1835 ได้ทำการสังเคราะห์เมลามีน โดยให้ความร้อนที่สูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของแคลเซียมไซยาไนด์ (CaCN_2) เพื่อเปลี่ยนเป็นเมลามีน ต่อมาในปี 1935 เฮนเกล

(Hengel) นำเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ไปผลิตเป็นเรซิน เมลามีนและฟอร์มัลดีไฮด์จะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80-100 °C จนเป็นเมธิลอลเมลามีน เมื่อให้ความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาควบแน่นเป็นเรซิน เรซินนี้จะไม่แข็งตัวเนื่องจากยังไม่มีปฏิกิริยาเชื่อมโยงพันธะจึงต้องเพิ่มความร้อนให้เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์กับเรซินเชื่อม โยงกันจนแข็งตัวเป็นเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (Melamine Formaldehyde Resins) ซึ่งเป็นพลาสติกเทอร์โมเซต ที่ไม่หลอมเหลว ไม่ละลาย มีผิวที่แข็งแรง ทนต่อการขีดข่วน ทนกรดได้ดี แต่ทนด่างได้ไม่ดีนัก ด้านทานการเกาะของคราบอาหาร ด้วยเหตุนี้จึงนิยมนำมาทำภาชนะดั่งที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ในการผลิตภาชนะเมลามีนมักมีการเติมสารตัวเติม เช่น เซลลูโลส ซิลิกา แก้ว และแอสเบสตอส เพื่อเพิ่มความสามารถด้านทานความร้อนและการไหลในการฉีดเข้าแบบเพื่อขึ้นรูปต่าง ๆ (ปริษา พลเทพ, 2535)

ในปี 1938 ประเทศสวีเดนแลนด์ได้นำเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์มาใช้ในอุตสาหกรรมเป็นที่แรก และมีการเจริญเติบโตออกไปในหลายประเทศทั่วโลก ปี 1951 ประเทศญี่ปุ่นผลิตเมลามีนเป็นที่แรกในทวีปเอเชีย ในปี 1973 ประเทศไทยเริ่มนำเมลามีนมาใช้ผลิตภาชนะเคลือบ งาน ชาม ถ้วยกาแฟ เป็นต้น ผลิตภัณฑ์จากเมลามีนเป็นที่นิยมอย่างมาก เนื่องจากมีความหลากหลายทั้งรูปทรง สี สัน ลวดลายที่สามารถเพิ่มเติมได้ (Goodman, S.W. ,1998).

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (กฤติยา วงศ์เลน, 2555)

ลักษณะทางกายภาพของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์	
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	1.47-1.52
สมบัติเชิงกลของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์	
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	34-90 MPa
ความแข็งแรงอัด (Compressive Strength)	227-310 MPa
ความแข็งแรงดัด (Flexural strength)	62-110 MPa
ความแข็งผิว (Hardness)	M115-M125
การทนแรงกระแทก (Impact energy)	13.3 J/m
โมดูลัสความโค้งงอ (Flexural Modulus)	7.58 GPa
สมบัติอื่นๆของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์	
อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต	149-204 °C
เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (24 ชั่วโมง ชั้นงานหนา 1/6 นิ้ว)	0.1-0.8%

ลักษณะทางกายภาพของเมลามีนคือเป็นของแข็งสีขาว ความหนาแน่น 1,574 kg/m³ จุดหลอมเหลว 350 °C (หรือ 623 K หรือ 662 °F) จุดเดือดจะเกิดการระเหิด (Sublimes)

ความสามารถในการละลายน้ำคือ 3.1 กรัมต่อลิตรที่อุณหภูมิ 20 °C เมลามีนละลายน้ำได้เพียงเล็กน้อย (สุรชน เกลิขยานนท์, 2551) สมบัติทางกลและลักษณะทางกายภาพของเมลามีนแสดงในตารางที่ 2.3

2.4.5 สารเพิ่มฟอง (Foaming agent)

สารเพิ่มฟองหรือสารลดแรงตึงผิว (Surfactants) สามารถนำมาผลิตฟองโฟมสำหรับผสมกับซีเมนต์เพสต์เป็นคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์รู สารเพิ่มฟองแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สารเพิ่มฟองชนิดโปรตีน (Protein based) และสารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ (Synthetic)

1) สารเพิ่มฟองชนิดโปรตีนที่ได้จากพืชหรือสัตว์

- โฟมที่ได้จากโปรตีนของสัตว์ โดยผ่านการหมักส่วนแข็ง เช่น กีบ เขา และขน เป็นต้น เมื่อย่อยสลายจะได้สารเพิ่มฟองที่มีสีน้ำตาลเข้ม กลิ่นแรง หากเก็บไว้เป็นเวลานานจะมีกลิ่นเหม็นมาก จึงไม่เป็นที่นิยม

- โฟมที่ได้จากโปรตีนของพืช จะได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจากไม่มีปัญหาในเรื่องของกลิ่นและการเก็บไว้เป็นเวลานาน สารเพิ่มฟองที่ได้จากโปรตีนพืชจะมีสีใส ไม่มีกลิ่น นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มคุณสมบัติให้ดีขึ้นโดยเติมสารบางชนิด เช่น สารที่ช่วยต้านการสลายตัวของแบคทีเรีย ทำให้เนื้อโฟมมีคุณภาพที่ดีขึ้น

2) สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ จำแนกตามกลุ่มไฮโดรโฟลิก (สารที่ละลายในน้ำ) ได้ 4 กลุ่มดังนี้

- สารลดแรงตึงผิวกลุ่มประจุบวก (Cationic) สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ไม่สามารถทำงานในสถานะที่เป็นค่าสูงได้ เนื่องจากเกิดการสูญเสียประจุบวก สารนี้นิยมใช้ทำน้ำยาปรับผ้านุ่ม ครีมนวดผม เป็นต้น สำหรับความนิยมในการนำสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกไปผลิตโฟมคอนกรีตมีเพียง 5 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

- สารลดแรงตึงผิวกลุ่มประจุลบ (Anionic) สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดหรือขจัดสิ่งสกปรก เช่น ผงซักฟอก น้ำยาล้างจานแชม เป็นต้น สำหรับความนิยมในการนำสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบไปผลิตโฟมคอนกรีตมีประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์

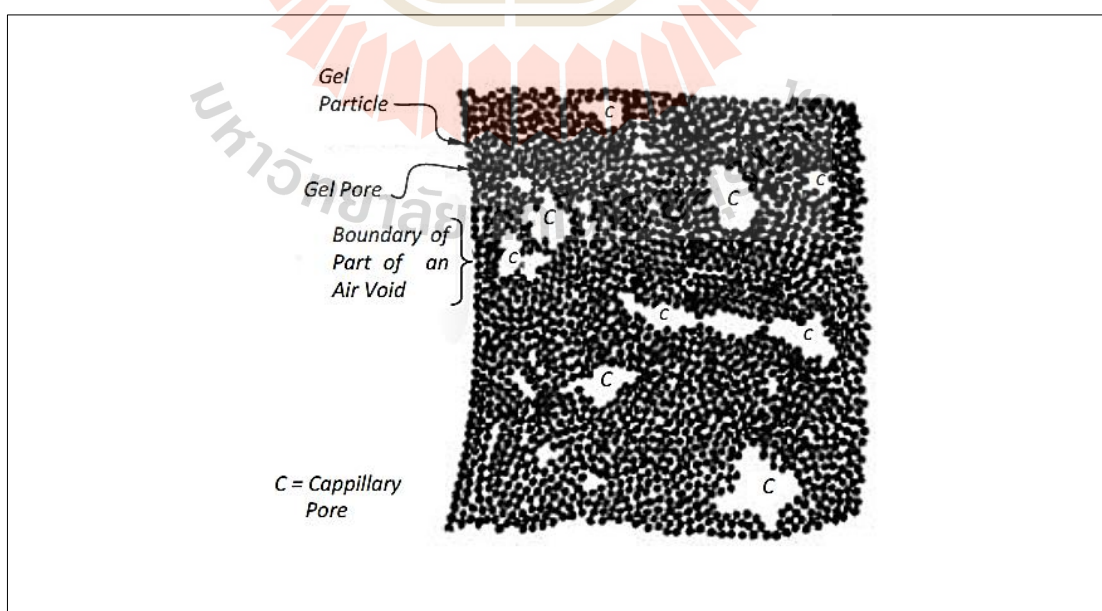
- สารลดแรงตึงผิวกลุ่มไม่มีประจุ (Non-ionic) สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้เป็นกลาง ไม่มีประจุ ทำให้มีเสถียรภาพ นิยมนำมาใช้ใน ผงซักฟอก น้ำยาล้างจานแชม ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด เป็นต้น สำหรับความนิยมในการนำสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุไปผลิตโฟมคอนกรีตมีประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์

- สารลดแรงตึงผิวกลุ่มสองประจุ (Amphoteretic หรือ Zwitterionic)

สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้สามารถปล่อยได้ทั้งประจุบวกและประจุลบตามสภาพแวดล้อม ถ้าอยู่ในสภาพแวดล้อมเป็นด่าง จะปล่อยประจุลบ แต่ถ้าเป็นกรดจะปล่อยประจุบวก นิยมนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับผิวหรือผม และไม่ได้ได้รับความนิยมในการนำมาผลิตโฟมคอนกรีต (วิสาข ภูจินดา, 2548).

2.5 โครงสร้างโพรงของคอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบาที่มีโครงสร้างของโพรง (Pore structure) จึงทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบา และสามารถกันความร้อนได้ กล่าวคือโครงสร้างโพรงส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบา โครงสร้างของโพรงประกอบด้วย โพรงเจล (Gel pore) โพรงคาปิลลารี (Capillary pore) และช่องว่างอากาศ (Air void) (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2556) จากรูปที่ 2.2 วงกลมสีดำที่ขนาดเล็กคือเม็ดซีเมนต์เจลไฮเดรต (Hydrated cement gel) ที่เป็นของแข็งเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์กับน้ำ ช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์เจลไฮเดรตคือโพรงเจลมีขนาดเล็กมากประมาณ $0.0005-0.01 \mu\text{m}$ ส่วนพื้นที่ว่างคือโพรงคาปิลลารี ซึ่งเป็นช่องว่างของน้ำที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีขนาดประมาณ $0.01-10 \mu\text{m}$ และช่องว่างอากาศมีขนาดประมาณ $0.1-1.0 \text{ mm}$ จะเห็นได้ว่าช่องว่างอากาศมีขนาดใหญ่กว่าโพรงคาปิลลารีและโพรงเจล ช่องว่างอากาศเกิดจากการกักฟองอากาศ (Air entrained) ของสารเพิ่มฟองหรืออาจเกิดจากการเทคอนกรีต (Entrapped pore) เพื่อหล่อคอนกรีต (Narayanan and Ramamurthy, 2000)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ (Powers and Helmut, 1953)

2.6 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design of experiment, DOE) เป็นการใช้สถิติในการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปร โดยมีการกำหนดตัวแปรอิสระหรือปัจจัย (Independence variables or factor, x) ที่มีความสัมพันธ์ต่อตัวแปรตามหรือผลตอบสนอง (Responses or output, y) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การออกแบบการทดลองให้เกิดประสิทธิผลต้องทำการลดความแปรปรวนของผลตอบสนอง เพื่อให้ผลตอบสนองเป็นไปตามจุดมุ่งหมายของการออกแบบการทดลองมากที่สุด วิธีการทดลองทั่วไปมีข้อแตกต่างจากการออกแบบการทดลอง (DOE) คือ วิธีการทดลองทั่วไปมักเป็นการทดลองแบบลองผิดลองถูก หรือการปรับตั้งค่าในการทดลองทีละค่า (One factor-at-a-Time, OFAT) เป็นผลให้ได้ผลตอบสนองตามจุดมุ่งหมายที่ต้องการได้ผลล่าช้าและอาจสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์จำนวนมาก (ชาตณรงค์ สายแก้ว, 2557)

2.6.1 หลักการพื้นฐาน

หลักการพื้นฐานที่สำคัญในการออกแบบการทดลองให้ได้ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือเพื่อสามารถวิเคราะห์และสรุปผลได้อย่างแม่นยำ ซึ่งหลักการพื้นฐานมี 3 ประการคือ

- 1) การสุ่ม (Randomization) เป็นการสุ่มข้อมูล เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่มีการกระจายตัวของข้อมูลอย่างสม่ำเสมอ จากการทดลองที่ไม่มีการควบคุมหรือการลำเอียงเกิดขึ้น โดยทั่วไปข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติจะเป็นข้อมูลที่ได้มาจากการสุ่ม ซึ่งสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองได้
- 2) การทดลองซ้ำ (Replication) เป็นการกำหนดจำนวนครั้งในการทำซ้ำการทดลองเพื่อประมาณค่าความผิดพลาดในการทดลองและทำให้การทดลองมีความแม่นยำมากขึ้น
- 3) การจัดกลุ่ม (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้จัดกลุ่มสิ่งๆ ที่เหมือนกันไว้กลุ่มเดียวกัน (Homogeneous) เพื่อเพิ่มความเที่ยงตรงให้กับการทดลองและลดความคลาดเคลื่อนจากความแตกต่างของหน่วยตัวอย่าง

2.6.2 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

มอน โกโมรี (Montgomery DC., 2009) กล่าวถึงแนวทางในการออกแบบการทดลองโดยการใช้วิธีเชิงสถิติเพื่อออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) การกำหนดปัญหา (Identify problem) เป็นการระบุปัญหาที่ต้องการแก้ไขหรือปรับปรุง เพื่อกำหนดเป้าหมายและวัตถุประสงค์ของการทดลองให้ชัดเจน
- 2) การเลือกปัจจัย และระดับของปัจจัย (Choice of factors, levels and ranges) เป็นการพิจารณาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองของการทดลอง เพื่อหาความสำคัญของปัจจัย
- 3) การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Selection of the response variable) เป็นการพิจารณา

ตัวแปรตอบสนองที่ใช้ในการวัดผล ซึ่งตัวแปรต้องสามารถให้ข้อมูลและวัดค่าได้

4) การเลือกการออกแบบการทดลอง (Select design) เป็นการพิจารณาวิธีการออกแบบการทดลองที่ให้เหมาะสมและได้ผลตรงตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง การออกแบบการทดลองที่นิยมใช้คือการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

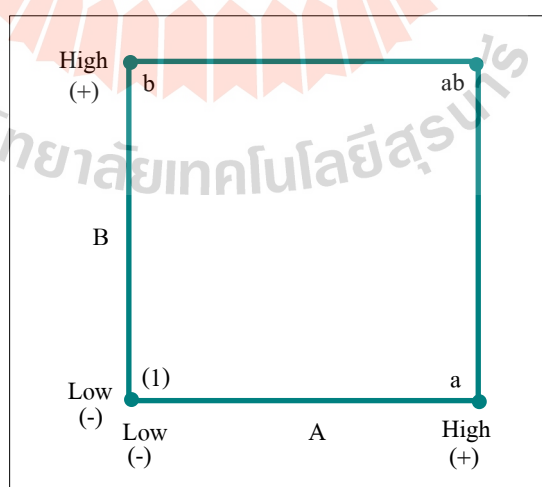
5) การดำเนินการทดลอง (Performing the experiment) ติดตามผลการดำเนินการทดลอง ควบคุมให้เป็นไปตามแผนการดำเนินงาน

6) การวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical analysis of data) เป็นการนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติว่าปัจจัยใดส่งผลต่อผลตอบสนองตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

7) สรุปผลการทดลองและเสนอแนะ (Conclusions and recommendations)

2.6.3 การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล (The 2^k Factorial design)

การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล โดยที่ 2 คือจำนวนระดับในแต่ละปัจจัย และ k คือจำนวนปัจจัย ซึ่งปัจจัยคือตัวแปรหรือพารามิเตอร์ที่สนใจ เป็นการออกแบบการทดลองที่มีปัจจัยตั้งแต่สองปัจจัยขึ้นไป การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียลนิยมนำมาใช้วิเคราะห์ปัจจัยหลาย ๆ ปัจจัยพร้อมกัน เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ และยังสามารถเห็นปัจจัยที่ส่งผลร่วมกัน เมื่อมีทริทเมนต์หรือปัจจัยที่มีตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปมารวมกันจะเรียกว่า ทริทเมนต์คอมบิเนชัน (treatment combination) ตัวอย่างการออกแบบการทดลองแบบ 2^2 แฟกทอเรียลคือการทดลองที่มี 2 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ รวมเป็น 4 ทริทเมนต์คอมบิเนชัน



รูปที่ 2.3 ทริทเมนต์คอมบิเนชันของแผนการทดลองแบบ 2^2 แฟกทอเรียล

(Montgomery, DC., Engineering Statistic, 5th ed. Page 365)

จากรูปที่ 2.3 แสดงการออกแบบการทดลองแบบ 2^2 แฟกทอเรียล ที่มีปัจจัยสองปัจจัยคือ ปัจจัย A และปัจจัย B โดยปัจจัย A ประกอบด้วย 2 ระดับคือ low และ high และการปัจจัย B ประกอบด้วย 2 ระดับคือ low และ high เช่นกัน การทดลองนี้จึงประกอบด้วย 4 ทริทเมนต์คอมบิเนชัน ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แผนการทดลอง 2^2 แฟกทอเรียล

สัญลักษณ์	ปัจจัย A	ปัจจัย B
(1)	Low (-)	Low (-)
a	High (+)	Low (-)
b	Low (-)	High (+)
ab	High (+)	High (+)

การออกแบบการทดลองแบบ 2^2 แฟกทอเรียลจะขึ้นอยู่กับจำนวนปัจจัยในการทดลอง ซึ่งออกแบบการทดลองแบบสุ่ม มีรูปแบบสมการ 2.6

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2.6)$$

เมื่อ $i = 1, 2, \dots, a$; $j = 1, 2, \dots, b$; $k = 1, 2, \dots, n$

y_{ijk} = ค่าสังเกตเมื่อปัจจัย A อยู่ที่ระดับ i , ปัจจัย B อยู่ที่ระดับ j และจำนวนซ้ำที่ k

μ = ค่าเฉลี่ยทั้งหมด

τ_i = อิทธิพลของปัจจัย A ที่ระดับ i

β_j = อิทธิพลของปัจจัย B ที่ระดับ j

$(\tau\beta)_{ij}$ = อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A ที่ระดับ i และปัจจัย B ที่ระดับ j

ε_i = ความคลาดเคลื่อนสุ่มของการทดลอง

Main effect หรืออิทธิพลหลัก เป็นผลที่เกิดจากปัจจัยเดี่ยว เช่น ปัจจัย A หรือ B interaction effect หรืออิทธิพลร่วมของปัจจัย เป็นผลที่เกิดจากการรวมกันของ 2 ปัจจัยหรือมากกว่า เช่น AB คือปัจจัย A และ B มีอิทธิพลร่วมกันต่อผลตอบสนอง

Contrast coefficients (-1, +1) คือเครื่องหมาย - แสดงระดับต่ำของปัจจัย และเครื่องหมาย + แสดงระดับสูงของปัจจัย นำมาใช้ประมาณอิทธิพลหลัก (main effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction effect) จากตารางที่ 4.4 เป็นการพิจารณา contrast coefficients แต่ละทริทเมนต์

คอมบินเนชันตามอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมของปัจจัย เมื่อพิจารณาที่ปัจจัย A ร่วมกับทรีทเมนต์คอมบินเนชัน a เป็นอิทธิพลหลักใส่เครื่องหมาย + พิจารณาปัจจัย A ร่วมกับทรีทเมนต์คอมบินเนชัน b ให้ใส่เครื่องหมาย - และปัจจัยร่วม AB การใส่เครื่องหมายจะพิจารณาจากผลคูณระหว่างอิทธิพลหลักของ A และอิทธิพลหลักของ B (ชาญณรงค์ สายแก้ว, 2557)

ตารางที่ 2.5 Contrast coefficients ของการออกแบบการทดลองแบบ 2^2 แฟกทอเรียล

Treatment combination	Factorial effect		
	ปัจจัย A	ปัจจัย B	ปัจจัยร่วม AB
(1)	-	-	+
a	+	-	-
b	-	+	-
ab	+	+	+

การคำนวณอิทธิพลหลักของ A พิจารณาที่คอนสแตนต์ factorial effect (A) ซึ่งได้จากผลต่างของค่าเฉลี่ยของระดับสูงและระดับต่ำดังสมการที่ 2.7 และการคำนวณอิทธิพลหลักของ B พิจารณาจาก factorial effect (B) มีการคำนวณในทำนองเดียวกันกับปัจจัย A ดังสมการที่ 2.8

$$A = y_{A+} - y_{A-} = \frac{a+b}{2n} - \frac{b+(1)}{2n} = \frac{1}{2n} [ab + a - b - (1)] \quad (2.7)$$

เมื่อ $n =$ จำนวนการทดลองซ้ำ (ครั้ง) และ $ab + a - b - (1)$ เรียกว่า contrast (A)

$$B = y_{B+} - y_{B-} = \frac{b+ab}{2n} - \frac{a+(1)}{2n} = \frac{1}{2n} [ab + b - a - (1)] \quad (2.8)$$

เมื่อ $ab + b - a - (1)$ เรียกว่า contrast (B)

การคำนวณหาอิทธิพลร่วมของปัจจัย AB พิจารณาจาก factorial effect (AB) สามารถหาได้ดังนี้

$$AB = y_{AB+} - y_{AB-} = \frac{ab+1}{2n} - \frac{a+b}{2n} = \frac{1}{2n} [ab + (1) - a - b] \quad (2.9)$$

นอกจากการคำนวณหาอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมแล้ว ยังมีการคำนวณผลรวมกำลังสอง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกการทดลองแบบ 2^2 แฟกทอเรียล ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการออกการทดลองแบบ 2^2 แฟกทอเรียล

Source of variation	Sum of squares	Degree of freedom	Mean squares	F-value
A	$SS_A = \frac{[ab+a-b-(1)]^2}{2^2 xn}$	1	$MS_A = \frac{SS_A}{1}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
B	$SS_B = \frac{[ab+b-a-(1)]^2}{2^2 xn}$	1	$MS_B = \frac{SS_B}{1}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
AB	$SS_{AB} = \frac{[ab+(1)-a-b]^2}{2^2 xn}$	1	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{1}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$	$2^k (n-1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{2^k (n-1)}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^2 y_{ijl}^2 - \frac{y^2 \dots}{2^2 xn}$	$(2^k xn) - 1$		

2.7 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Phaiboon Panyakapo และ Mallika Panyakapo (2008) ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์พลาสติกเทอร์โมเซตติงเป็นส่วนผสมในคอนกรีตมวลเบา ซึ่งคาดว่าจะสามารถเพิ่มมูลค่าด้วยการใช้เป็นส่วนผสมสำหรับผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบไม่รับแรง การทดลองจะทำการผันแปรส่วนผสมเพื่อกำหนดส่วนผสมที่เหมาะสมกับคุณสมบัติที่ต้องการของคอนกรีตมวลเบา ในเรื่องความหนาแน่นแห้งต่ำและค่ากำลังรับแรงอัดที่ยอมรับได้ โดยการออกแบบอัตราส่วนผสมของพลาสติก ทราฮา อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ผงอลูมิเนียม และเถ้าลอย ผลการทดลองพบว่าพลาสติกทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตต่ำลง และความแข็งแรงลดลงเช่นกัน ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมของซีเมนต์ ทราฮา เถ้าลอย และพลาสติกเท่ากับ 1.0:0.8:0.3:0.9 ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 4.14 N/mm^2 และความหนาแน่นแห้งเท่ากับ $1,395 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่ตรงกับคอนกรีตมวลเบาแบบไม่รับแรงตามมาตรฐาน ASTM C129 Type II.

Hasan S. Dweik และคณะ (2008) ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต ที่มีข้อจำกัดในเรื่องความแข็งแรงดึงต่ำ อัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักต่ำ และมีความเป็นฉนวนน้ำ

ความร้อนปานกลาง ในการปรับปรุงจะนำเศษเมลามีนมาแทนที่ทรายบางส่วนในคอนกรีต และทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง กำลังรับแรงอัด หน่วงน้ำหนัก และความเป็นฉนวนของคอนกรีต ในการผสมจะผันแปรอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีน (ร้อยละ 0 ถึง ร้อยละ 60) จากการทดลองพบว่าเมื่อแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักลดลง และที่การแทนที่ร้อยละ 30 ให้ความแข็งแรงสูงสุดเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผสมเศษเมลามีน ซึ่งอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักเพิ่มขึ้นร้อยละ 47 นอกจากนี้คอนกรีตยังเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีขึ้นร้อยละ 30 ที่การแทนที่ด้วยเศษเมลามีนร้อยละ 60 จากงานวิจัยสามารถสรุปได้ว่าการนำเศษเมลามีนมาแทนที่ทรายในการผสมคอนกรีตช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางความร้อนของคอนกรีตได้ และยังเป็นแนวทางในการกำจัดเศษเมลามีนอีกด้วย

S.C. Kou และคณะ (2009) ทำการศึกษาความสดและความแข็งแรงของคอนกรีตที่ใช้มวลรวม น้ำหนักเบาที่เตรียมจากเศษท่อพีวีซี ซึ่งใช้แทนที่ทรายเป็นมวลรวมละเอียด สัดส่วนการแทนที่ เท่ากับร้อยละ 0, 5, 15, 30 และ 45 โดยปริมาตร ผลการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ปัจจัยหลัก ผลทางบวก ของการใช้เศษพีวีซีคือคอนกรีตมีน้ำหนักเบา มีความเหนียวมากขึ้น (อัตราส่วนปัวซองดีขึ้นและค่าอิลาสติคโมดูลัสลดลง) การหดตัวลดลง และมีการทนทานต่อการกัดกร่อนของคลอไรด์ ผลทางลบ ของการใช้เศษพีวีซีคือความสามารถทำงานได้ กำลังรับแรงอัด และความต้านทานแรงดึงของ คอนกรีตลดลง จากผลดังกล่าวทำให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับการใช้เศษพลาสติกพีวีซี ในการผสมกับคอนกรีตเป็นมวลรวมน้ำหนักเบา

C.Albano และคณะ (2009) ทำการศึกษาสมบัติทางกลของคอนกรีตผสมพอลิเอธิลีนเทเลฟทาเลต (Polyethylene terephthalate: PET) โดยทำการแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (0.50 และ 0.60) ปริมาณ PET (ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร) และขนาดอนุภาค และมีการศึกษาอิทธิพล ของการสลายตัวด้วยความร้อนของ PET เมื่อนำมาผสมและผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ (200, 400, 600°C) ผลการทดลองพบว่าเมื่อสัดส่วนปริมาตรและขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้น ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัด ความแข็งแรงดึง โมดูลัสอีลาสติค และความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิคลดลง แต่การดูดซึมน้ำมีค่า เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันค่าการรับแรงคดของคอนกรีตที่ผสม PET เมื่อได้รับความร้อนทำให้ คอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น ความแข็งแรงขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ตลอดจนปริมาณ PET และขนาดอนุภาค

Semiha AkÇaözöglü และคณะ (2010) ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์ขวดพอลิเอธิลีน เทเลฟทาเลต (PET) ถูกนำมาบดเป็นเม็ดใช้เป็นมวลรวมน้ำหนักเบาในมอร์ตาร์ ซึ่งจะดำเนินการศึกษาโดยแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกทำจากมวลรวม PET เพียงอย่างเดียว และกลุ่มที่สอง ทำจากมวลรวม PET และทรายเข้าด้วยกัน นอกจากนี้ยังมีการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast-furnace slag) มาแทนที่ซีเมนต์ตามมวลที่ถูกแทนด้วยอัตราส่วนร้อยละ 50 เพื่อลดปริมาณ

และประหยัคซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อตัวประสาน (w/b) และอัตราส่วน PET ต่อตัวประสาน (PET/b) ที่ใช้ในการผสมคือ 0.45 และ 0.5 ตามลำดับ ขนาดของเศษเม็ด PET ที่ใช้ในการเตรียมผสม มอร์ต้าร์อยู่ระหว่าง 0 และ 4 mm. ผลที่ได้จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการและการดำเนินการ ทดสอบพบว่ามอร์ต้าร์ที่เติมมวลรวม PET เพียงอย่างเดียว มอร์ต้าร์ที่เติมมวลรวม PET ผสมกับ ทราย และมอร์ต้าร์ที่ปรับปรุงโดยใช้ตะกรันแทนซีเมนต์ สามารถจัดอยู่ในหมวดหมู่ของคอนกรีต มวลเบา ในด้านของหน่วยน้ำหนักและคุณสมบัติความแข็งแรง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการใช้ประโยชน์ จากเศษเม็ด PET สามารถใช้เป็นมวลรวมในการผลิตคอนกรีตมวลเบามีโครงสร้างที่มีศักยภาพ เนื่องจากเศษเม็ด PET มีน้ำหนักเบาซึ่งช่วยลดน้ำหนักของคอนกรีตได้ ส่งผลให้น้ำหนักคงที่ (Death weight) ของโครงสร้างในกลุ่มของสิ่งก่อสร้างลดลง ช่วยลดความเสี่ยงของสิ่งปลูกสร้างในเรื่อง แผ่นดินไหว เนื่องจากแรงกระทำของแผ่นดินไหวซึ่งขึ้นอยู่กับน้ำหนักคงที่โดยตรง นอกจากนี้ก็ยัง สรุปได้ว่าการใช้ขยะอุตสาหกรรมอย่างเช่นเม็ดพลาสติก PET และตะกรันเตาถลุงเหล็กในคอนกรีต มีข้อดีบางอย่างเช่น ลดการใช้ทรัพยากรทางธรรมชาติ กำจัดของเสีย การป้องกันมลพิษสิ่งแวดล้อม และประหยัดพลังงาน

Mariaenrica Frigione (2010) ทำการศึกษาการแทนที่ทรายด้วยพอลิเอธิลีนเทเลฟทาเลต (PET) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เศษขวด PET (WPET) ถูกทำให้มีลักษณะเป็นเม็ดคล้ายกับทราย ซึ่ง ทดสอบจะมีปริมาณซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกัน ในการขึ้นรูป จากนั้นขึ้น ทดสอบถูกนำไปทดสอบความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต (Workability) สำหรับทดสอบ คอนกรีตสด (Fresh concrete) และเมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 28 และ 365 วัน ถูกนำไปทดสอบสมบัติ เเชิงกล เพื่อศึกษาอิทธิพลของการแทนที่ทรายด้วย PET จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตผสม WPET ให้ค่าความสามารถทำงานได้ กำลังรับแรงอัด (Compressive strength) และกำลังดึงแยก (Split tensile strength) ค่อนข้างจะต่ำกว่าคอนกรีตอ้างอิง และมีความเหนียวสูงขึ้นปานกลาง จาก มุมมองทางนิเวศวิทยา ทางเศรษฐกิจและการอนุรักษ์พลังงานจะได้ประโยชน์จากการนำเศษ PET มาใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคอนกรีต ประโยชน์หลักของการรีไซเคิล PET ในคอนกรีต คือ สามารถใช้งานพลาสติกนี้ได้ โดยไม่จำเป็นต้องเป็นพลาสติกบริสุทธิ์ ไม่ต้องการกำจัดสี เช่นเดียวกับการรีไซเคิล PET ด้วยวิธีอื่น ๆ

Kinda Hannawi และคณะ (2010) ทำการศึกษาการใช้พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) และพอลิเอธิลีนเทเลฟทาเลต (PET) แทนที่มวลรวมธรรมชาติในมอร์ต้าร์ โดยสัดส่วนการแทนที่ ทรายด้วยพลาสติกเท่ากับร้อยละ 3, 10, 20 และ 50 โดยปริมาตรของทราย เพื่อศึกษาสมบัติทาง กายภาพและเชิงกลของวัสดุผสมที่ได้ ผลการศึกษาพบว่ามีความเป็นไปได้ของการนำเศษพลาสติก PC และ PET ในการแทนที่ทรายเป็นวัสดุมวลรวมในวัสดุผสมซีเมนต์ แม้การใช้พลาสติก PC และ PET จะมีข้อบกพร่องบางอย่างเช่น การลดลงของกำลังรับแรงอัด แต่ก็ยังมีข้อดี ในเรื่องการลด

น้ำหนักของวัสดุผสมซีเมนต์ และการปรับปรุงพฤติกรรมการตัด โค้ง จากการคำนวณค่าความเหนียวเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสัดส่วน PC และ PET เพิ่มขึ้น ดังนั้นการเติม PC และ PET ในวัสดุผสมซีเมนต์ทำให้วัสดุดูดซับพลังงานได้ดี จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างมากสำหรับงานด้านวิศวกรรมโยธาหลายประเภท เช่น งาน โครงสร้างภายใต้แรงกระทำแบบไดนามิกหรือแรงกระแทก

Md. Mostafizur Rahman และคณะ (2012) ทำการศึกษาศึกษาภาพของวัสดุรีไซเคิลพอลิเมอร์ที่นำมาแทนที่มวลรวมในคอนกรีต ของเสียดพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยมี 2 ประเภท ได้แก่ พอลิยูรีเทนพอร์มาลดีไฮด์ (PUF) และพอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ซึ่งวัสดุพอลิ-เมอร์ถูกนำมารีไซเคิล โดยตัวอย่างของคอนกรีตบล็อกและคอนกรีตก่ออิฐจะถูกนำไปทดสอบ เพื่อศึกษาผลกระทบของวัสดุพอลิเมอร์ที่มีต่อสมบัติทางกล ทางกายภาพและทางสัญญาณวิทยาของคอนกรีต และพอลิบล็อก จากผลการทดลองพบว่า การใช้วัสดุที่เป็นของเสียดพอลิเมอร์สามารถลดความหนาแน่น ความพรุนและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตและพอลิบล็อกอย่างมีนัยสำคัญ พอลิบล็อกผสมพอลิยูรีเทนพอร์มาลดีไฮด์ (PUF) มีความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตผสม HDPE คอนกรีตสามารถนำมาใช้ในงานโครงสร้างที่ไม่รับน้ำหนัก โครงสร้างลอยตัว และวัสดุที่มีน้ำหนักเบา

Nitish Puri และคณะ (2013) การทดลองในห้องปฏิบัติการดำเนินการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของคอนกรีตซีเมนต์เกรด M25 ทำจากการแทนที่มวลรวมด้วยเศษพลาสติก เช่น เศษ PVC เศษหนัง และเศษวัสดุก่อสร้าง ตัวอย่างคอนกรีตถูกนำมาทดสอบ น้ำหนัก กำลังรับ-แรงอัด การยุบตัว และความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต เปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ ผลการทดลองพบว่า การใช้วัสดุเหลือใช้ในการก่อตัวของคอนกรีตมวลเบา กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อมวลรวมหยาบถูกแทนที่บางส่วนและแทนที่ทั้งหมดด้วยเศษวัสดุก่อสร้าง อย่างไรก็ตามความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตลดลงเล็กน้อย เมื่อแทนที่มวลรวมหยาบด้วยเศษ PVC ในสัดส่วนร้อยละ โดยน้ำหนัก แต่การแทนที่ทรายด้วยเศษหนังในคอนกรีต พบว่าคอนกรีตผ่านการทดสอบความสามารถทำงานได้ แต่กำลังรับแรงอัดไม่ผ่านการทดสอบ และให้ความแข็งแรงเกือบจะเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงยกเว้นเศษหนัง แต่สำหรับวัสดุอื่น ๆ เช่นเศษวัสดุก่อสร้างและเศษพีวีซีสามารถแทนที่ได้ทั้งหมดหรือบางส่วนในคอนกรีตและสามารถหาแนวทางที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมการก่อสร้างเพื่อทดแทนวัสดุทั่วไปได้ การใช้วัสดุเหลือใช้จะไม่เพียงแต่ลดค่าใช้จ่ายของโครงสร้าง แต่ยังมีส่วนช่วยในการกำจัดของเสียอย่างปลอดภัย นอกเหนือจากจะเป็นประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อม การใช้ของเสียดังกล่าวยังช่วยปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตด้วย

Nabajyoti Saikia และ Jorge de Britoa (2013) ทำการศึกษาพฤติกรรมความแข็งแรงของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของพอลิเอธิลีน (PET) สามประเภท ประกอบด้วย PP, PF และ PC นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ผลกระทบของความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงดึงแยก และกำลังรับแรงอัด เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับลักษณะความ

แข็งแรงอื่น ๆ ที่กำหนดในรหัสออกแบบของยุโรป สำหรับคอนกรีตที่ทำจากมวลรวม PET การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ PET ทั้งหมดมีลักษณะเช่นเดียวกับคอนกรีตทั่วไป การผสม PET บางชนิดจะทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง แต่การผสมมวลรวม PET ช่วยปรับปรุงความเหนียวของคอนกรีต พฤติกรรมนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างของมวลรวม PET ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นและมีผิวสัมผัสที่หยาบมาก สมบัติการรับแรงดึงและการรับแรงคดงอเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการสูญเสียความสามารถรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีมวลรวมพลาสติก

Ning Liu และ Bing Chen (2014) ทำการศึกษาคอนกรีตพอลิโอสไตรีน (EPS) เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีน้ำหนักเบาแบบใหม่ ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลที่ดีและเหมาะสมกับอุตสาหกรรมก่อสร้าง สมบัติทางกลของคอนกรีต EPS จะกำหนดให้สัมพันธ์กับเมทริกซ์คอนกรีตและขนาดอนุภาคของ EPS งานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัด การต้านทานแรงดึง และการต้านทานแรงคดงอของคอนกรีต EPS ที่มีขนาดอนุภาค EPS แตกต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่า การทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่ดำเนินการในระหว่างขั้นตอนการให้โหลดแรงอัดที่รับแรงคดแบบแกนเดียวจนเสียหาย ผลการทดสอบแบบอัลตราโซนิกแสดงให้เห็นว่าสมบัติเชิงกลของคอนกรีต EPS มีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคและปริมาณของอนุภาค EPS นอกจากนี้วิธีการทดสอบด้วยอัลตราโซนิกยังสามารถตรวจจับความเสียหายของคอนกรีต EPS ระหว่างกระบวนการให้โหลดได้

M.Muzafar Ahmed และ Dr. S. Siddi Raju (2015) คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมก่อสร้าง การผลิตของเสียที่เป็นของแข็ง (Solid waste) เพิ่มขึ้นเป็นประจำทุกวันทำให้เกิดความวิตกกังวลอย่างรุนแรงต่อสิ่งแวดล้อม ในการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาพลาสติกที่ผ่านการรีไซเคิลถูกนำมาใช้ในคอนกรีต โดยแทนที่มวลรวมหยาบบางส่วนในคอนกรีต วัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตเช่นความสามารถในการทำงานได้ ค่ากำลังรับแรงอัดและการต้านทานแรงดึงในการแทนที่มวลรวมหยาบบางส่วน รวมถึงการศึกษาลักษณะทางความร้อนของคอนกรีตด้วย ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ขยะพลาสติกในคอนกรีตส่งผลต่อการก่อตัวของคอนกรีตมวลเบา คุณสมบัติเช่นแรงอัดและแรงดึงลดลงเมื่อมีการเติมพลาสติกลงในคอนกรีตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การนำความร้อนของคอนกรีตลดลงเมื่อผสมพลาสติกกับคอนกรีต

Amir M. Azhdarpour (2016) และคณะ ทำการศึกษาผลกระทบของการเติมเศษพลาสติกต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีต ในการผสมจะกำหนดให้ปริมาณมวลรวมหยาบ (กรวด) และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่ เติมพลาสติกที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 ผลการเติมเศษพลาสติกทำให้คุณสมบัติทางกายภาพและความแข็งแรงของคอนกรีตใหม่ โดยเฉพาะสมบัติทางกายภาพที่ลดลงเมื่อเติมเศษพลาสติกเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันค่ากำลังรับ-แรงอัด ความแข็งแรงดึงและความต้านทานแรงคดงอของตัวอย่างเพิ่มขึ้นที่การเติมร้อยละ 5-10 ของคอนกรีตที่ถูกแทนที่ด้วย

มวลรวมละเอียดพิเศษ PET ผลของการเติมเศษ PET มากกว่าร้อยละ 10 ความแข็งแรงของคอนกรีตลดลง

Nattakan Dulsang และคณะ (2016) ทำการศึกษาคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตจากเอทิลไวนิลอะซีเตท (Ethyl vinyl acetate; EVA) ที่เป็นของเสียใน โรงงานผลิตรองเท้า โดยนำมาแทนที่มวลรวมทั่วไปที่สัดส่วนร้อยละ 3, 5, 7 และ 10 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และอัตราส่วน EVA ต่อทรายเท่ากับ 0.50 สำหรับทุกการผสม ผลการทดสอบพบว่าน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาผสม EVA ลดลง เมื่อสัดส่วนของ EVA เพิ่มมากขึ้น และคอนกรีตมวลเบาผสม EVA สามารถปรับปรุงสมบัติการนำความร้อน การทนทานสารเคมี และการดูดซึมน้ำได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาผสมพอลิเมอร์ชนิดอื่น ของเสีย EVA เป็นมวลรวมน้ำหนักเบาที่มีศักยภาพดีสามารถนำไปใช้งานในคอนกรีตมวลเบาได้ คอนกรีตมวลเบาผสม EVA เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นวัสดุก่อสร้างและเป็นทางเลือกที่ดีในการรีไซเคิลของเสียพลาสติก

Ali A.Sayadi และคณะ (2016) ทำการศึกษาผลกระทบของเม็ดโฟมพอลิสไตรีน EPS ต่อการทนไฟ การนำความร้อนและกำลังรับแรงอัดของโฟมคอนกรีต (Foamed concrete) เม็ดโฟม EPS ใช้เป็นมวลรวมในโฟมคอนกรีต โดยกำหนดความหนาแน่นอยู่ในช่วง 150 ถึง 1200 kg/m³ ที่ปริมาณ EPS อยู่ในช่วงร้อยละ 0 ถึง 82.22 โดยปริมาตร และอัตราส่วนน้ำต่อสารยึดประสานเท่ากับ 0.33 ซึ่งสารยึดประสานในงานวิจัยนี้จะใช้ซีเมนต์และเถ้าลอย (Fly ash) เป็นสารยึดประสานร่วมกัน โฟมคอนกรีตที่ความหนาแน่น 800 kg/m³ ไม่มีการผสม EPS ถูกใช้เป็นคอนกรีตอ้างอิงสำหรับเปรียบเทียบกับ EPS คอนกรีต จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณของ EPS ส่งผลให้การทนไฟ การนำความร้อนและกำลังรับแรงอัดของโฟมคอนกรีตลดลงอย่างมีนัยสำคัญ สามารถสรุปได้ว่า ปริมาณซีเมนต์ ปริมาตรโฟม และปริมาตร EPS ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของคอนกรีต อย่างไรก็ตามการใช้ EPS ในปริมาณสูงส่งผลดีในเรื่องความหนาแน่นและน้ำหนักของคอนกรีตที่ลดลง

M. Guendouz และคณะ (2016) ศึกษาการใช้ประโยชน์เศษพลาสติก 2 ประเภทได้แก่ PET และ LDPE (ที่ใช้ในกระบวนการผลิตถุงพลาสติก) ในรูปแบบเส้นใยและแบบมวลรวมละเอียด (ผง) ในคอนกรีต ปริมาณของทรายบางส่วนถูกแทนที่ด้วยเศษพลาสติกใช้เป็นมวลรวมละเอียดผง LDPE (10%, 20%, 30% และ 40% โดยปริมาตร) และเส้นใยพลาสติก PET (0.5%, 1%, 1.5% และ 2% โดยปริมาตร) ถูกนำมาใช้ในคอนกรีต ทำการศึกษาคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางกลของคอนกรีต จากผลการศึกษาพบว่า การใช้เศษพลาสติกแทนที่ทรายบางส่วน ทำให้ความหนาแน่นจำเพาะ (bulk density) ลดลงและมีส่วนของรูพรุน (Air content) เพิ่มขึ้น ทำให้กำลังรับแรงอัดและการรับแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่การแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 นอกจากนี้เส้นใยพลาสติกยังช่วยเสริมแรงในเนื้อคอนกรีตทำให้ค่าความแข็งแรงดิ่งถูกปรับปรุงไปอย่างชัดเจน งานวิจัยนี้ทำให้มั่นใจได้ว่าการใช้

เศษพลาสติกในคอนกรีตทราย (sand concrete) นั้นให้ผลเชิงบวกในด้านการลดต้นทุน วัสดุและแก้ไขปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม

Ashwini Manjunath B T (2016) ทำการศึกษาการจัดการและการรีไซเคิลของเสียพลาสติกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic plastic waste or E-plastic waste) ที่เติบโตอย่างรวดเร็ว มีแหล่งกำเนิดมาจากอุตสาหกรรมไอที ที่ค่อนข้างอันตรายและมีอัตราการรีไซเคิลต่ำ การใช้ประโยชน์ของเสียพลาสติกอิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนหนึ่งในการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศน์ รวมถึงลดต้นทุนมวลรวม เพิ่มความแข็งแรงสำหรับงาน โครงสร้างและถนน นอกจากนี้ยังลดต้นทุนของหลุมขยะและประหยัดพลังงาน ของเสียพลาสติกอิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วยของเสียพลาสติกจากคอมพิวเตอร์ ทีวี ตู้เย็น และวิทยุเก่า พลาสติกเหล่านี้ไม่เกิดการย่อยสลายจึงสามารถใช้แทนที่มวลรวมละเอียดหรือมวลรวมหยาบในคอนกรีต งานวิจัยนี้จะแทนที่มวลรวมในช่วงร้อยละ 0, 20 และ 30 เพื่อศึกษากำลังรับแรงอัด การต้านทานแรงดึง การรับแรงดัด โค้งของคอนกรีตที่ผสมของเสียพลาสติกอิเล็กทรอนิกส์เทียบกับเกณฑ์คอนกรีต M20 จากการศึกษาพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำของเสียพลาสติกอิเล็กทรอนิกส์มาแทนที่มวลรวมหยาบ การแทนที่มวลรวมร้อยละ 10 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดดีที่สุด

Nikoo Haghighatnejad และคณะ (2016) ทำการศึกษาสมบัติของคอนกรีตที่มีการแทนที่ทรายด้วยพีวีซีรีไซเคิล (RPVC) ร้อยละ 20, 30, 40 และ 50 ภายใต้เงื่อนไขการบ่มที่แตกต่างกัน เงื่อนไขการบ่มประกอบด้วย 6 รูปแบบคือ บ่มในน้ำ บ่มในอากาศ บ่มในแลบ และในอีกสามระบบ บ่มจนครบอายุ 3, 7 และ 14 วัน ศึกษาผลของเทคนิคการบ่มต่อกำลังรับแรงอัด ความต้านทานแรงดึงแยก อิลาสติคโมดูลัส และการดูดซึมน้ำ จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่ม RPVC ทำให้สมบัติเชิงกลของคอนกรีตลดลงโดยไม่คำนึงถึงเงื่อนไขการบ่ม อย่างไรก็ตามเงื่อนไขการบ่มส่งผลต่อความแข็งแรงทั้งคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสม RPVC ที่มีความไวต่อการบ่มคอนกรีต ยิ่งไปกว่านั้น CEB-FIP model code สามารถทำนายค่าการต้านทานแรงดึงแยกของคอนกรีตผสม RPVC ที่เงื่อนไขการบ่มแตกต่างกัน คอนกรีตผสม RPVC มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ เป็นคอนกรีตที่มีคุณภาพดี โดยทั่วไปการบ่มในน้ำเป็นเงื่อนไขการบ่มที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคอนกรีต อย่างไรก็ตามการบ่มคอนกรีตผสม RPVC ในน้ำช่วงแรกที่มีอายุ 14 และ 7 วัน มีความแข็งแรงลดลงร้อยละ 7.3 และ 9.8 ตามลำดับ

Sina Safinia และคณะ (2016) ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้งานขวดพลาสติกในคอนกรีตบล็อก ขวดพลาสติกถูกนำมาใช้สร้างช่องว่างในคอนกรีต โดยวางขวดพลาสติกขนาด 500 ml ในบล็อกล่อคอนกรีตแล้วเทคอนกรีตห่อหุ้มขวดและทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C140 จากผลการศึกษาพบว่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นระหว่างคอนกรีตทรงกระบอก คอนกรีตบล็อกขวดพลาสติก และคอนกรีตบล็อกฮาโล เป็นค่าที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตาม

ตามในการเปรียบเทียบการใช้ขวดพลาสติกในคอนกรีตบล็อกเทียบกับคอนกรีตบล็อกฮาโลมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าร้อยละ 57 หากมีการศึกษาเรื่องคุณสมบัติ เศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อมเพิ่มเติม อาจช่วยเน้นถึงประโยชน์ของการใช้ขวดพลาสติกในคอนกรีตบล็อกได้

Mehmet Gesoglu และคณะ (2017) ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและการแตกหักของคอนกรีตแบบ Self-compacting (คอนกรีตที่สามารถไหลเข้าแบบได้โดยไม่ต้องใช้การสั่นช่วย) ที่ผสมกับผงพลาสติก โดยผงพลาสติก PVC ถูกนำมาแทนที่ซีเมนต์บางส่วนที่ร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นการออกแบบส่วนผสม Six SCC กำหนดค่าการไหลเท่ากับ 700 ± 30 mm สารยึดประสานทั้งหมดรวม 550 kg/m^3 และอัตราส่วนน้ำต่อสารยึดประสานเท่ากับ 0.35 การทดสอบเชิงกลของ SCCs ประกอบด้วยกำลังรับแรงอัด การต้านทานแรงดึงแยก การรับแรงดัดโค้ง ตลอดจนอิมัลชันโมดูลัส ที่อายุบ่ม 28 วัน นอกจากนี้ยังมีการทดสอบการแตกหักของคอนกรีตได้แก่ การทดสอบแรงดัดแบบ 3 จุดบนชิ้นงานแบบคาน จากผลการศึกษาพบว่าผง PVC ส่งผลลบต่อความแข็งแรงของคอนกรีต เนื่องจากความอ่อนแอของวัสดุ PW ทำให้ความแข็ง พื้นที่ใต้กราฟการรับน้ำหนักและพลังงานแตกหักมีขนาดเล็กลง ในกรณีของคอนกรีตที่ผ่านการปรับปรุงด้วย PW อย่างไรก็ตามธรรมชาติของผง PW ที่มีความความยืดหยุ่นมากมีผลต่อการเคลื่อนที่สุดท้ายที่สูงขึ้น ลักษณะความยาว และค่าความเครียดที่สูงขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าความต้านทานแรงดึงที่ต่ำ ผลกระทบที่เกิดจากการรวมกันของ PVC กับทรายนั้นทำให้พฤติกรรมการเปราะของคอนกรีตผสม PW น้อยกว่าคอนกรีตอ้างอิง

Deividas Rumšys และคณะ (2017) ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ประโยชน์พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูงและพอลิเอธิลีนความหนาแน่นต่ำเป็นมวลรวมในคอนกรีตมวลเบา ทำการทดลองและเปรียบเทียบสมบัติวัสดุของคอนกรีตผสมพอลิเอธิลีนกับคอนกรีตผสมดินเหนียว จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของตัวอย่างคอนกรีตที่มวลรวมต่างกันถูกนำมาทดสอบความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic pulse velocity) จากการทดลองพบว่าการใช้พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูงและต่ำในคอนกรีตทำให้การดูดซึมน้ำต่ำและมีผิวสัมผัสที่ไม่ชอบน้ำ ซึ่งคอนกรีตที่มีการดูดซึมน้ำต่ำหลังจากอายุบ่ม 7 วันจะพบว่าอัตราการพัฒนาความแข็งแรงลดลง ตัวอย่างคอนกรีตความหนาแน่น $1,950\text{-}2,050 \text{ kg/m}^3$ ให้ค่ากำลังรับแรงอัดอย่างน้อย 40 MPa การใช้มวลรวมดินเหนียวมีองค์ประกอบคล้ายกันกับคอนกรีตความหนาแน่น $1,900 \text{ kg/m}^3$ ที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงถึง 70.2 MPa แม้ว่าจะมีสมบัติเชิงกลคล้ายคลึงกับคอนกรีตพลาสติก แต่คอนกรีตผสมดินเหนียวมีกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ดีกว่าทำให้การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาลดลง

Nursyamsi และคณะ (2017) ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์วัสดุทดแทนของมวลรวมคอนกรีต อาทิเช่น ของเสียจากอุตสาหกรรม และมวลรวมอื่นๆ ที่มีน้ำหนักเบา เนื่องจากวัสดุเหล่านี้สามารถกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรม ทั้งยังช่วยลดน้ำหนักของโครงสร้างอาคาร งานวิจัยนี้จึง

ศึกษาการใช้ประโยชน์เศษพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเลฟทาเลตที่มีน้ำหนักเบาเป็นมวลรวมหยาบพลาสติก PET ได้จากการนำ PET ไปให้ความร้อน แล้วปล่อยให้เย็นตัว จากนั้นนำไปบดเป็นมวลรวมที่มีหลายขนาด จุดประสงค์ของงานวิจัยคือการหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเบาที่ใช้พลาสติก PET เป็นมวลรวมหยาบและศึกษาอิทธิพลของขนาดผลของมวลรวมต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต การทดสอบวัสดุที่มีคุณสมบัติความละเอียดต่าง ๆ ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดในตัวอย่างที่ใช้มวลรวมพลาสติก PET ที่มีค่ามอดูลัสความละเอียดสูงที่สุด จากมาตรฐาน SNI 03-3994-2002 น้ำหนักและกำลังรับแรงอัดของวัสดุตรงตามมาตรฐาน เป็นผลมาจากขนาดผลของมวลรวมหยาบของเศษพลาสติก PET อาจมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเบา

Chalermchai Chaitongat และ Somsak Siwadamrongpong (2018) ได้ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์จากเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ในคอนกรีตมวลเบา เศษเมลามีนที่ใช้ในการศึกษามี 2 แบบคือเศษเมลามีนแบบเม็ด (เศษกริบ) และเศษเมลามีนแบบฝุ่น จะนำเศษเมลามีนมาแทนที่ทรายในอัตราส่วน 0, 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนัก ที่ความหนาแน่น และ $1,300 \text{ kg/m}^3$ กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และอัตราส่วนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดคงที่ ขึ้นรูปขึ้นทดสอบสำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อน ผลการทดสอบพบว่าเศษเมลามีนสามารถแทนที่ทรายในคอนกรีตมวลเบาได้ ที่การเติมเศษเมลามีนร้อยละ 25 ทำให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด แต่มีการดูดซึมน้ำมากกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ ดังนั้นจึงมีการทดลองเพิ่มเติมโดยการเปลี่ยนความหนาแน่นจาก $1,000 \text{ kg/m}^3$ เป็น $1,100 \text{ kg/m}^3$ และเลือกใช้การแทนที่ทรายร้อยละ 25 ผลการทดสอบพบว่าการดูดซึมน้ำลดลงและมีสูตรการผสมที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมคือสูตรที่ผสมเศษเมลามีนแบบเม็ด แต่เศษเมลามีนที่เติมเศษฝุ่นมีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าการเติมเศษเม็ด การทดสอบการชะล้างสารละลายของเมลามีนตรวจพบสารหนู (As) เมื่อนำเศษเมลามีนมาเติมในคอนกรีตมวลเบาพบว่าสารหนูที่ถูกชะล้างออกมามีปริมาณน้อยลงเมื่อเทียบกับเศษเมลามีนอย่างเดียว ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้เศษเม็ดเมลามีนแทนที่ทรายบางส่วนสามารถผลิตบล็อกคอนกรีตมวลเบาสำหรับใช้ก่อผนังในงานก่อสร้างได้

2.8 สรุป

ตารางที่ 2.7 การแทนที่มวลรวมด้วยพลาสติกในคอนกรีตหรือมอร์ตาร์

Year	Reference	Type of composite	type of Plastic	Amount of substitution
2008	Panyakapo	Non-load-bearing lightweight concrete	Melamine	Sand fraction in aerated concrete
	Hasan	concrete	Melamine	Fine aggregate 0, 10, 20, 30, 40, 50 and 60 vol.%
2009	Kou	Lightweight aggregate concrete	PVC pipe	Fine aggregate 0, 5, 15, 30 and 45 vol.%
	Albano	Concrete	PET-bottle	Fine aggregate 10 and 20 vol.%
2010	AkÇaözoğlu	Mortar	PET-bottle	Fine aggregate 50 and 100 vol.%
	Frigione	Concrete	PET-bottle	Fine aggregate 5 w.%
	Hannawi	Concrete	PET and PC waste	Fine aggregate 3, 10, 20 and 50 vol.%
2012	Rahman	Concrete Poly block	HDPE PUF	Coarse aggregate, 10, 15, 20 and 25 w.%(for HDPE) PUF was equivalent to 33-90% of total volume of the sample.
2013	Puri	Cement concrete grade M25	PVC waste Leather waste Construction debris	Coarse aggregate, 5 and 10 w.%(for PVC and Leather waste) Coarse aggregate 100, 50 and 25 w.%(for Construction debris)
	Saikiaa	concrete	PET aggregate comprising of PP, PF and PP	Volume fraction of PET aggregate (%)
2014	Ning Liu	Lightweight concrete	EPS	Volume fraction of EPS (%)
2015	Ahmed	Concrete	Plastic solid waste	Coarse aggregate 10 and 20 w.%
2016	Azhdarpour	concrete	PET bottle	Coarse aggregate 5, 10, 15, 20, 25 and 30 w.%
	Dulsang	Lightweight concrete	EVA	Fine aggregate 3, 5, 7 and 10 w.%

ตารางที่ 2.7 การแทนที่มวลรวมด้วยพลาสติกในคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ (ต่อ)

Year	Reference	Type of composite	type of Plastic	Amount of substitution
2016	Sayadi	Foamed concrete	EPS	Volume fraction of EPS (%)
	Guendouz	Sand concrete	PET fibers LDPE powder	Volume fraction of PET fibers (10, 20, 30 and 40%) Volume fraction of LDPE powder (0.5, 1, 1.5 and 2%)
	Manjunath	Concrete	Electronic plastic waste	Coarse aggregate 10 20 and 30 w.%
	Haghighatnejad	Concrete	PVC	Fine aggregate 20, 30, 40 and 50 vol.%
	Safinia	Concrete block	PET bottle	PET bottle 500 ml of 8 bottle as lightweight aggregate in concrete
2017	Gesoglu	Self-compacting concrete	PVC powder	Volume fraction of PVC powder (%)
	Rumšys	Lightweight concrete	LDPE and HDPE	Weight fraction of LDPE and HDPE (%)
	Nursyamsi	Light concrete	PET	Variation of Fineness modulus of PET coarse aggregate
2018	Chaitongrat	Cellular lightweight concrete	Melamine	Fine aggregate 15, 25 and 35 w.%

ตารางที่ 2.8 สมบัติทางกลของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์จากรายงานของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Reference	Density	Slump	Compressive strength	Splitting tensile strength	Flexural strength	Elastic modulus	Water absorption	Thermal conductivity
Panyakapo	↓	n/a	↓	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Hasan	↓	n/a	↑	n/a	n/a	n/a	n/a	↓
Kou	↓	n/a	↓	↓	n/a	↓	n/a	n/a
Albano	n/a	↓	↓	↓	n/a	↓	↑	n/a
AkÇaözoglu	↓	n/a	↓	n/a	↓	n/a	↓	n/a
Frigione	n/a	n/a	↓	↓	n/a	n/a	n/a	n/a
Hannawi	↓	n/a	↓	↓	↓	n/a	n/a	n/a
Rahman	↓	n/a	↓	n/a	n/a	n/a	↓	n/a
Puri	n/a	↓	↓	n/a	↓	n/a	n/a	n/a
Saikia	n/a	n/a	↓	↑	↑	n/a	↑	n/a

ตารางที่ 2.8 สมบัติทางกลของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์จากรายงานของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

Reference	Density	Slump	Compressive strength	Splitting tensile strength	Flexural strength	Elastic modulus	Water absorption	Thermal conductivity
Ning Liu	n/a	n/a	↓	n/a	↓	↓	n/a	n/a
Ahmed	↓	↑	↓	↓	n/a	n/a	n/a	↓
Azhdarpour	↓	n/a	↓	↓	↓	↓	n/a	n/a
Dulsang	↓	n/a	↓	n/a	n/a	n/a	↓	↓
Sayadi	↑	n/a	↓	n/a	n/a	n/a	n/a	↑
Guendouz	↓	↓	↑	n/a	↑	n/a	n/a	n/a
Manjunath	n/a	↓	↓	↓	↓	n/a	n/a	n/a
Haghighatnejad	n/a	↓	↓	↓	n/a	↓	↓	n/a
Safinia	↓	n/a	↓	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Gesoglu	n/a	n/a	↓	↓	↓	↓	n/a	n/a
Rumşys	↓	n/a	↓	↓	n/a	n/a	↓	n/a
Nursyamsi	↓	n/a	↓	n/a	n/a	n/a	↓	n/a
Chaitongrat	↓	n/a	↑	n/a	n/a	n/a	↑	↑

วิธีการรีไซเคิลขยะพลาสติกโดยผสมกับปูนซีเมนต์ ขยะพลาสติกถูกนำมาใช้เป็นมวลรวมผสมในคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ โดยใช้ขยะพลาสติกมาแทนที่มวลรวม ซึ่งได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตั้งแต่ปี 2008 ถึง 2018 โดยจำแนกเป็นชนิดของคอนกรีต ชนิดของพลาสติก และปริมาณการแทนที่ โดยสามารถสรุปได้ในตารางที่ 2.7 พบว่าขยะที่นำมารีไซเคิลเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก อาทิเช่น ขวดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต (polyethylene terephthalate: PET) เนื่องจากมีการอุปโภคบริโภคสูงและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง มีการศึกษาวิจัยจำนวนมาก ต่างจากการรีไซเคิลขยะพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงที่มีผู้ศึกษาจำนวนน้อย ซึ่งการใช้ขยะพลาสติกเป็นมวลรวมในคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ ส่งผลต่อความหนาแน่น การยุบตัว กำลังรับแรงอัด การรับแรงดึงแยกแบบผ่าซีก มอดูลัสอีลาสติก การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.8 โดยส่วนใหญ่ขยะพลาสติกจะส่งผลเชิงบวกในเรื่องน้ำหนักเบา มีค่าการดูดซึมน้ำ และการนำความร้อนของคอนกรีตลดลง ในขณะที่ความแข็งแรงของคอนกรีตส่งผลเชิงลบในเรื่องความแข็งแรงของคอนกรีต แต่เศษเมลามีนส่งผลในทางตรงกันข้ามคือส่งผลดีต่อความแข็งแรงของคอนกรีตและส่งผลลบต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีต จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แนวทางในการดำเนินงานวิจัยคือ เป็นแนวทางในการรีไซเคิลเศษพลาสติก วิธีการวางแผนการทดสอบมาตรฐานการทดสอบ และเห็นแนวโน้มความแข็งแรงของคอนกรีตที่ผสมขยะพลาสติก

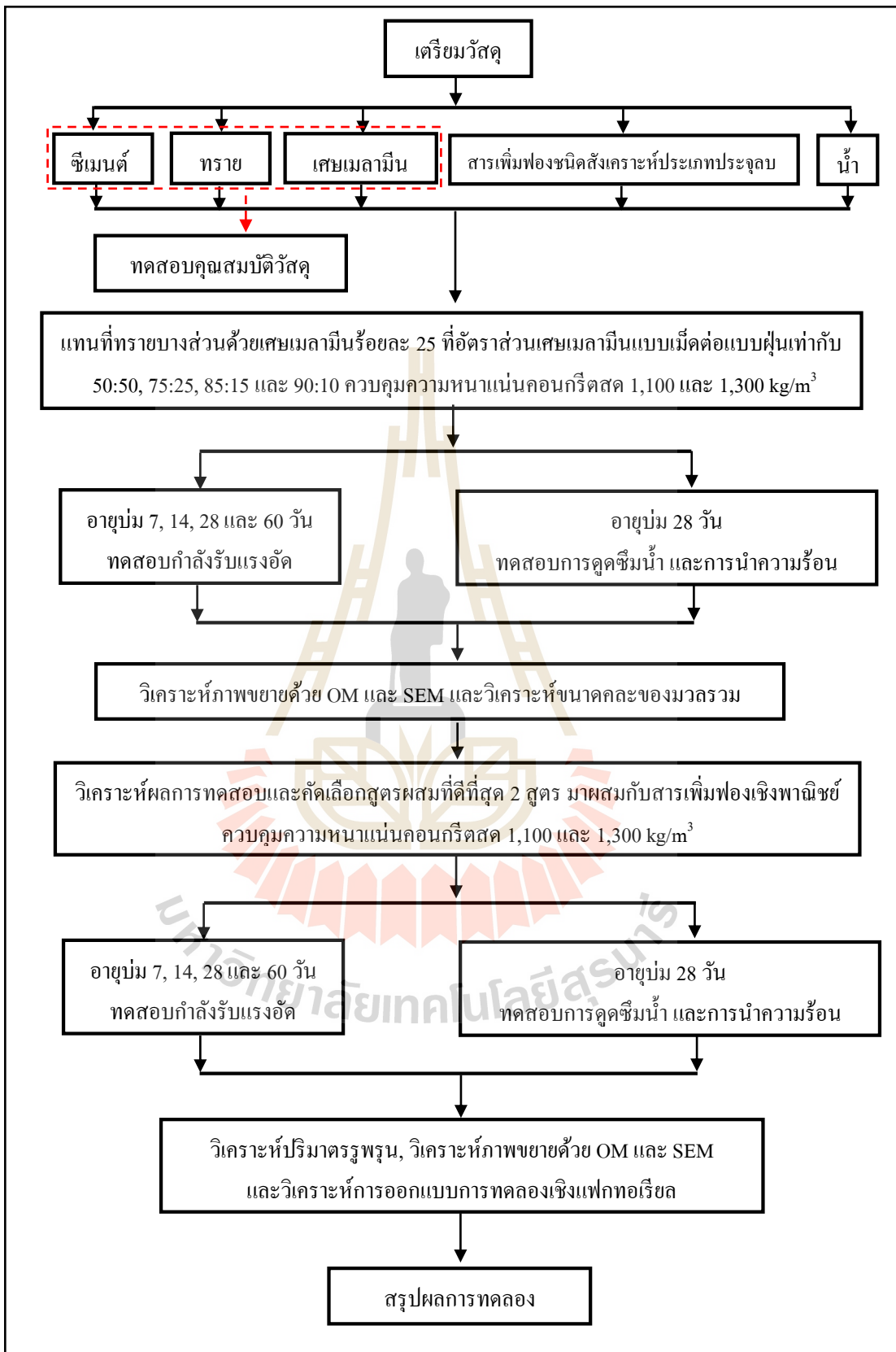
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

พลาสติกเทอร์โมเซตติงเช่นเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ นิยมใช้ในการผลิตเครื่องใช้บนโต๊ะอาหารขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน เศษเมลามีนเป็นของเสียในกระบวนการผลิต ซึ่งมีสองรูปแบบคือเศษครีบบเมลามีนและเศษเมลามีนแบบฝุ่น เศษครีบบเมลามีนเกิดขึ้นปริมาณมากกว่าเศษเมลามีนแบบฝุ่น ทั้งนี้การกำจัดเศษเมลามีนทั้งสองรูปแบบทำให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการใช้ประโยชน์เศษเมลามีนเป็นมวลรวมละเอียดในคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส เศษเมลามีนดังกล่าวถูกนำไปแทนที่ทรายร้อยละ 25 โดยเน้นการใช้ประโยชน์เศษครีบบเมลามีนบดเป็นเศษเมลามีนแบบเม็ด และเพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์เศษเมลามีนได้ทั้งสองรูปแบบจึงนำเศษเมลามีนแบบฝุ่นผสมรวมกัน

ในบทนี้อธิบายถึงรายละเอียดวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยแนวทางในการศึกษาแบ่งแผนการดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่างเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นเท่ากับ 50:50, 75:25, 85:15 และ 90:10 ในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 ที่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา ในส่วนที่สองเป็นการเปรียบเทียบสารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 กับสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ยี่ห้อ tripple trees จากผลการทดลองส่วนแรกสามารถคัดเลือกสูตรผสมที่ให้กำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำอยู่ในเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐาน มอก. เลขที่ 2601-2556 เพื่อนำสูตรผสมไปผสมกับสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา รวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล และการวิเคราะห์ระดับคุณภาพของโครงสร้างคอนกรีตมวลเบา เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบาและสรุปผลการดำเนินงานวิจัย แผนการดำเนินงานวิจัยแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

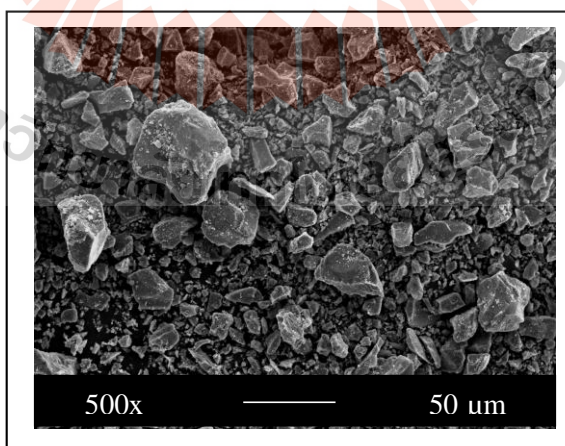
3.2 วัสดุ (Materials)

3.2.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland cement type 1 หรือ OPC) เป็นปูนมาตรฐานทั่วไปที่ใช้ในงานโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงสูง อาทิเช่น ถนน อาคารสูง และเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์คอนกรีต เช่น เสา คาน พื้น ฐานราก ในงานวิจัยเลือกใช้ปูนซีเมนต์ของยี่ห้อเอสซีจี ไฮบริด (รูปที่ 3.2) มีลักษณะเป็นผงสีเทา รูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม และมีพื้นผิวค่อนข้างขรุขระดังแสดงในรูปที่ 3.3



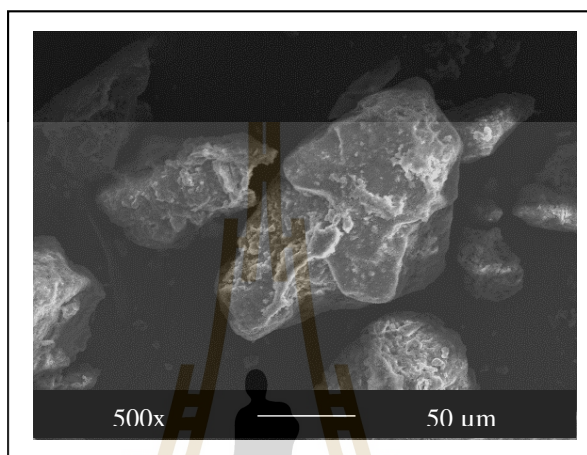
รูปที่ 3.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เอสซีจี ไฮบริด



รูปที่ 3.3 ภาพขยายของปูนซีเมนต์ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า

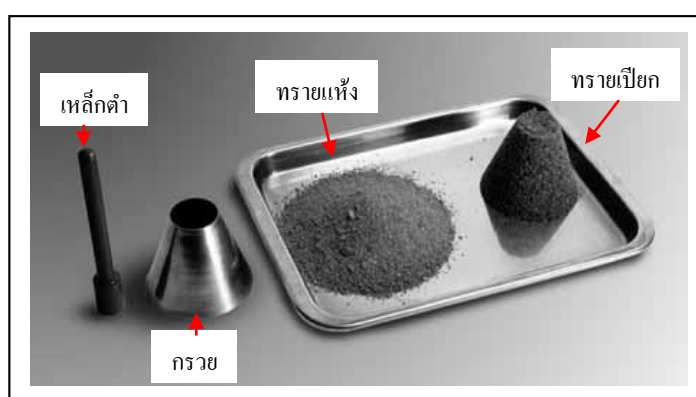
3.2.2 ทราย

ทรายเป็นส่วนผสมหลักในงานคอนกรีตที่จัดเป็นมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 สำหรับทรายที่ใช้ในงานวิจัยคือทรายแม่น้ำที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงร่อนเบอร์ 16 จากภาพถ่ายของทรายด้วย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าทรายมีรูปร่างเป็นก้อนค่อนข้างมน และมีผิวขรุขระเล็กน้อย



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายของทรายด้วย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า

การควบคุมความชื้นของทรายด้วยวิธีการทดสอบความชื้นที่พื้นผิว โดยทรายจะถูกบรรจุลงในกรวย ซึ่งวางกรวยด้านเส้นผ่านศูนย์กลางด้านที่มีขนาดใหญ่ไว้ด้านล่างบนพื้นที่เรียบ ใต้ทรายจนล้นกรวย ใช้มือป้องทรายไว้ไม่ให้หล่นออกนอกกรวย ปล่อยเหล็กต๋าลงบนทรายที่ขอดีกรวย 25 ครั้ง แต่ครั้งให้เหล็กต๋าลงจากผิวทรายต่ำสุด 5 mm จากนั้นปาดพอดิปากกรวย ยกกรวยขึ้นตรง ๆ ถ้าทรายยังเปียกทรายจะคงรูปเป็นรูปกรวยไม่เกิดการพังทลาย ถ้าทรายเริ่มพังทะลายลง แสดงว่าทรายเริ่มเข้าสู่สภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD) ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ทรายที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง และสภาพเปียก

3.2.3 น้ำ

น้ำเป็นส่วนผสมที่สำคัญในการผสมส่วนผสมให้เข้ากัน น้ำที่ใช้ในการผสมควรเป็นน้ำประปาสะอาด ไม่มีสารปนเปื้อนที่อาจเป็นอันตรายต่อคอนกรีต น้ำประปาสะอาดที่ใช้ในงานวิจัยมีค่า PH ในช่วง 7.5-8

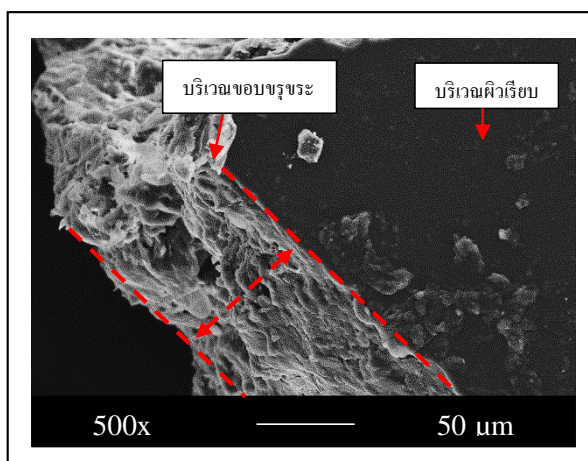
3.2.4 เศษเมลามีน

เศษเมลามีนที่ใช้ในงานวิจัยได้รับจาก บริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน) ผู้ผลิตเครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร (Tableware product) ซึ่งเศษเมลามีนแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

1. เศษเมลามีนแบบเม็ด (Melamine formaldehyde waste granule; MFG) ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (hot compression molding process) เป็นผลิตภัณฑ์เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์จะถูกร้อนแล้วอัดเข้าแม่แบบ ซึ่งเมลามีนบางส่วนทะลักออกนอกแม่แบบเพื่อป้องกันการอัดขึ้นรูปที่ไม่สมบูรณ์ ส่วนเกินดังกล่าวเรียกว่าเศษครีบบเมลามีน ดังแสดงในรูปที่ 3.6(ก) เป็นของเสียในกระบวนการผลิตที่มีปริมาณประมาณ 1 ตันต่อวัน เศษครีบบเมลามีนถูกนำมาเข้าเครื่องบดพลาสติกให้มีขนาดเล็กกลงเป็นเศษเมลามีนแบบเม็ดดังแสดงในรูปที่ 3.6(ข)



รูปที่ 3.6 ลักษณะเศษเมลามีนแบบเม็ด



รูปที่ 3.7 ภาพขยายของเศษเมลามีนแบบเม็ดด้วย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า

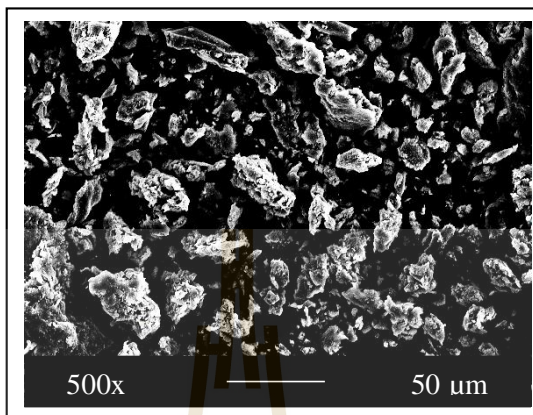
ภาพขยายของเศษเมลามีนแบบเม็ดด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าเศษเมลามีนแบบเม็ดมีรูปร่างเป็นก้อนแบน (Flaky) และผิวของเศษเมลามีนแบบเม็ดแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือบริเวณผิวปกติที่มีผิวเรียบและบริเวณขอบที่มีผิวขรุขระอย่างมาก เนื่องจากเป็นบริเวณที่ถูกบดขยี้ให้มีขนาดเล็กลง ดังนั้นเศษเมลามีนแบบเม็ดจึงมีผิวที่กึ่งเรียบกึ่งขรุขระ

2. เศษเมลามีนแบบฝุ่น (Melamine formaldehyde waste powder, MFP) ได้จากระบวนการตัดตกแต่งขอบของผลิตภัณฑ์เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร เมื่อกำจัดเศษครีบบเมลามีนออกไปจะทำให้ขอบขรุขระ จึงต้องมีขั้นตอนการตัดตกแต่งที่ทำให้เกิดเป็นผงฝุ่นขนาดเล็กถือเป็นของเสียเช่นเดียวกับเศษครีบบแต่มีปริมาณเพียงร้อยละ 5 ของของเสียทั้งหมดในกระบวนการผลิตเศษเมลามีนแบบฝุ่นแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ลักษณะเศษเมลามีนแบบฝุ่น

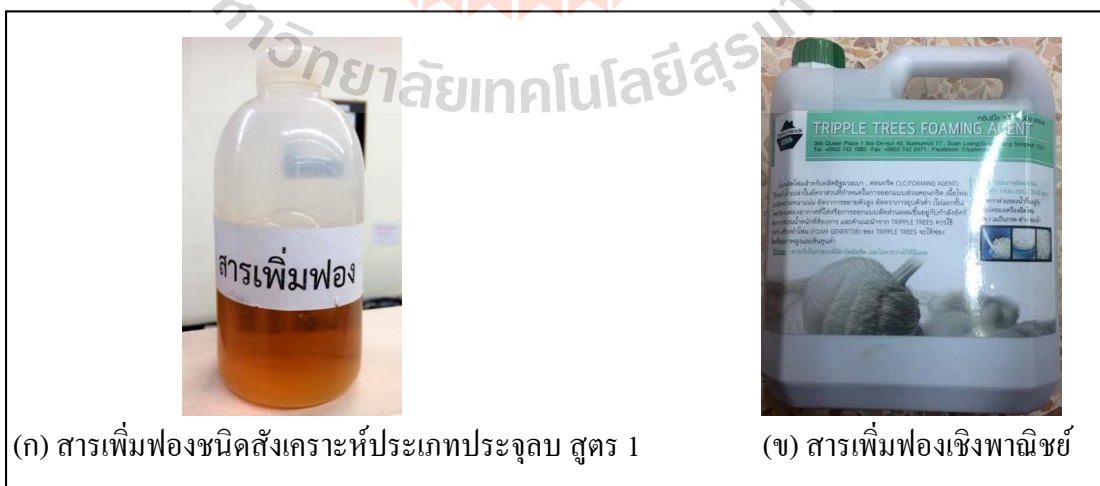
ภาพขยายของเศษเมลามีนแบบฟุ้งด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าเศษเมลามีนแบบฟุ้งมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ และมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเศษเมลามีนแบบเม็ดและทราย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เศษเมลามีนแบบฟุ้งมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก



รูปที่ 3.9 ภาพขยายของเศษเมลามีนแบบฟุ้งด้วย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า

3.2.5 สารเพิ่มฟอง

สารเพิ่มฟองที่ใช้ในงานวิจัยเป็นสารเพิ่มโฟมชนิดสังเคราะห์ (Synthetic foaming agent) ซึ่งเลือกใช้สารเพิ่มฟอง 2 ยี่ห้อคือ สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 เป็นสารเพิ่มฟองเพื่อผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส ได้รับจาก ชีรวัฒน์ สนิทศิริ และคณะ, 2554 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ Tripple trees foaming agent ได้รับจาก บริษัท ช.จิตรผล จำกัด สารเพิ่มฟองทั้งสองยี่ห้อจะถูกนำไปเจือจางด้วยน้ำด้วยอัตราส่วนสารเพิ่มฟองต่อน้ำ 1:40 โดยน้ำหนัก



(ก) สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1

(ข) สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์

รูปที่ 3.10 สารเพิ่มฟอง

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.3.1 เครื่องบดพลาสติก

เครื่องบดพลาสติก (Plastic recycling machinery) รุ่น DK-5953 ดังรูปที่ 3.11 ใช้สำหรับบดย่อยเศษครีบบเมลามีนด้วยกระบวนการเชิงกลให้มีขนาดเล็กกลง ที่เรียกว่าเศษเมลามีนแบบเม็ดเพื่อนำไปผสมในคอนกรีตมวลเบา



รูปที่ 3.11 เครื่องบดพลาสติก



รูปที่ 3.12 เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน

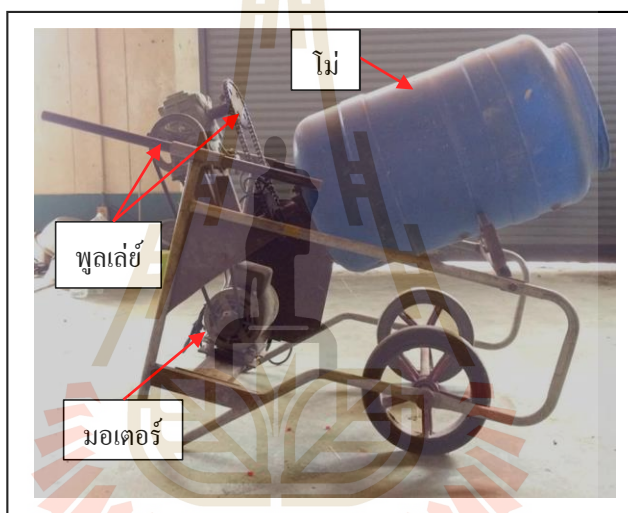
3.3.2 เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน

เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Vibratory sieve shakers) ยี่ห้อ Retsch รุ่น AS200 แสดงในรูปที่ 3.12 ใช้สำหรับร่อนเศษฝุ่นเมลามีนที่ได้จากโรงงานเพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอม ก่อนนำเศษเมลามีนแบบฝุ่นไปผสมในคอนกรีตมวลเบา และใช้เครื่องเขย่าตะแกรงร่อนคู่กับชุดตะแกรงร่อนมาตรฐาน ASTM E11 เพื่อหาขนาดคละของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 โดยใช้ตะแกรงร่อนตามขนาดดังต่อไปนี้

- ตะแกรงร่อนเบอร์ 4 ขนาดช่องว่าง 4.75 mm
- ตะแกรงร่อนเบอร์ 8 ขนาดช่องว่าง 2.36 mm
- ตะแกรงร่อนเบอร์ 16 ขนาดช่องว่าง 1.18 mm
- ตะแกรงร่อนเบอร์ 30 ขนาดช่องว่าง 0.60 mm
- ตะแกรงร่อนเบอร์ 40 ขนาดช่องว่าง 0.42 mm
- ตะแกรงร่อนเบอร์ 50 ขนาดช่องว่าง 0.30 mm
- ตะแกรงร่อนเบอร์ 100 ขนาดช่องว่าง 0.15 mm

3.3.3 เครื่องผสม

ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องผสม (Mixer) แบบ โม่ผสมเอียงที่สร้างขึ้นมาโดยเฉพาะ (รูปที่ 3.13) ได้รับความจาก เกลิมชัย ไชยชรัตน์, 2559 เพื่อให้เหมาะสมกับปริมาณของคอนกรีตมวลเบา ส่วนประกอบของเครื่องผสมประกอบด้วย โม่ (Drum) ทำจากถังพลาสติกพอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene) ปริมาตร 120 ลิตร ความจุในการผสมต่อครั้งสูงสุดไม่เกิน 0.025 m^3 ถึงเอียงทำมุม 22 องศาสำหรับการเทคอนกรีตออกจากโม่ ด้านในถังติดตั้งใบกวนสำหรับช่วยกวนส่วนผสมให้เข้ากัน ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด $\frac{1}{2}$ แรงม้า หมุนด้วยความเร็ว 1,450 รอบต่อนาที เชื่อมต่อกับพูลเลย์ (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 63.5 mm และ 152.4 mm) และชุดเกียร์ทดรอบ (อัตราทด 1:50) เครื่องผสมจึงมีอัตราการหมุนถังผสม 12 รอบต่อนาที



รูปที่ 3.13 เครื่องผสม

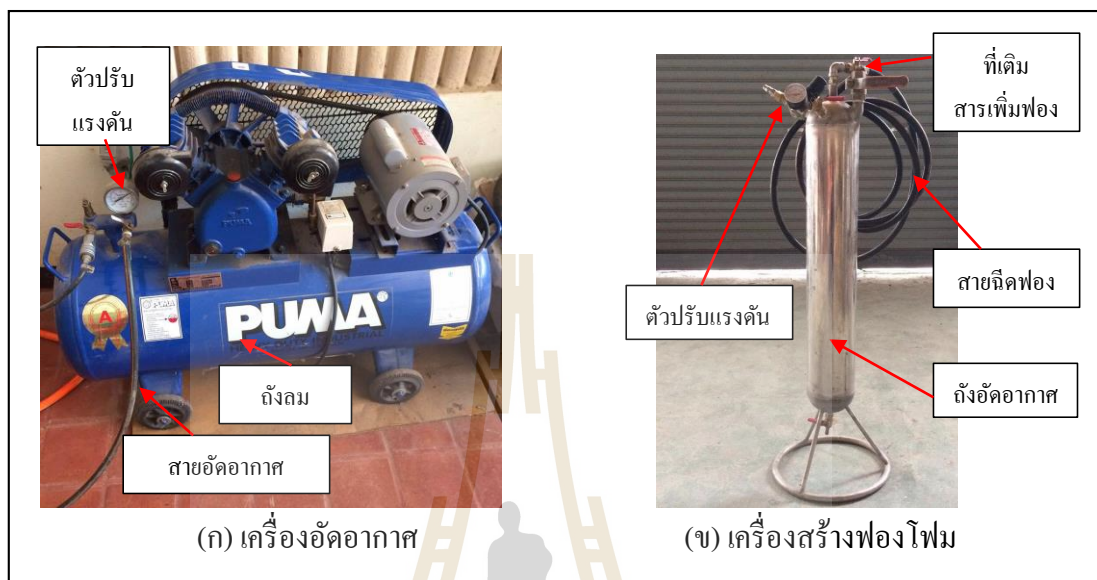
3.3.4 เครื่องสร้างฟองโฟมและเครื่องอัดอากาศ

เครื่องสร้างฟองโฟม (Foam generator) ดังแสดงในรูปที่ 3.10(ก) เป็นเครื่องสร้างฟองโฟม ได้รับความจาก เกลิมชัย ไชยชรัตน์, 2559 ใช้งานร่วมกับเครื่องอัดอากาศ (Air compressor) ดังแสดงในรูปที่ 3.14(ข) หลักการทำงานของเครื่องสร้างฟองโฟมคือ เติมสารเพิ่มฟองที่เจือจางด้วยน้ำ (สารเพิ่มฟองต่อน้ำ 1:40 โดยน้ำหนัก) จากนั้นอัดอากาศโดยที่เครื่องสร้างฟองโฟมจะมีตัวปรับแรงดันเข้าถึงให้ความดันภายในถังถึง 0.5 MPa

3.3.5 เครื่องชั่งน้ำหนักและภาชนะที่ทราบปริมาตร

เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล รุ่น Pioneer (PA4120C) ยี่ห้อ OHAUS ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ความละเอียด 0.01 กรัม ชั่งได้สูงสุด 4,100 กรัม สำหรับชั่งเตรียมวัสดุในการขึ้นรูปชิ้นทดสอบ และใช้ชั่งน้ำหนักคอนกรีตสดเพื่อกำหนดหาความหนาแน่นของคอนกรีตจากอัตราส่วนน้ำหนักของ

คอนกรีตสดต่อปริมาตรของภาชนะ มีหน่วยเป็น kg/m^3 โดยใช้ภาชนะ (Container) ที่ทราบปริมาตร เป็นภาชนะปริมาตร 1 ลิตรใช้สำหรับบรรจุคอนกรีตสด



รูปที่ 3.14 เครื่องอัดอากาศและเครื่องสร้างฟองโฟม



รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด



รูปที่ 3.16 เตาอบลมร้อน

3.3.6 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

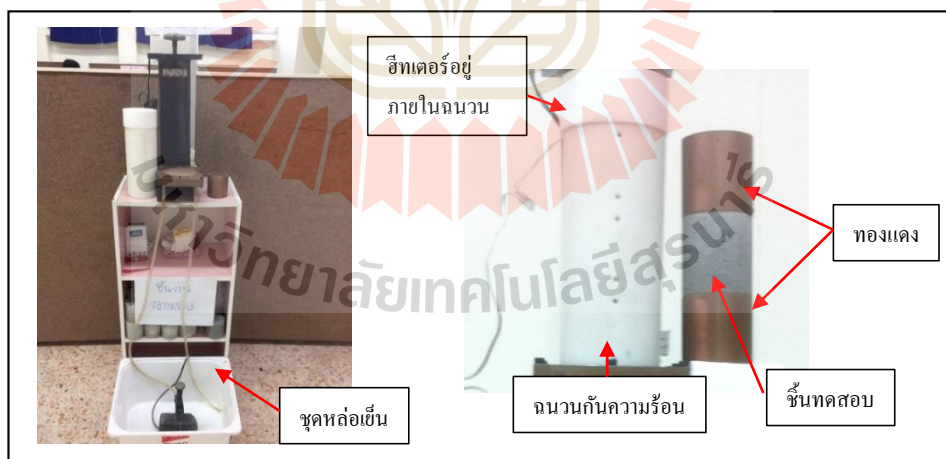
เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machines) รุ่น NRI-TS500-50 กำลังสูงสุด 50 kN แสดงในรูปที่ 3.15 สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยให้แรงกดอัดที่ผิวด้านหน้าด้วยแรงกด 1 kN/s ในทิศทางตั้งฉากกับแนวแรง

3.3.7 เตาอบลมร้อน

เตาอบลมร้อน (Hot air oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น BE-200 ใช้สำหรับอบชิ้นทดสอบ การดูดซึมน้ำและอบวัสดุสำหรับทดสอบสมบัติวัสดุ เตาอบนี้สามารถปรับตั้งอุณหภูมิและปรับตั้งเวลาได้ เตาอบลมร้อนแสดงในรูปที่ 3.16

3.3.8 เครื่องทดสอบการนำความร้อน

การทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาประกอบด้วย ฮีทเตอร์ ทองแดง จนวนกันความร้อน เทอร์โมมิเตอร์ และชุดหล่อเย็น หลักการทดสอบคือใช้ฮีทเตอร์ให้ความร้อนแก่ทองแดงแล้วถ่ายเทความร้อนต่อไปที่ผิวด้านหนึ่งของชิ้นทดสอบ และอีกด้านหนึ่งของชิ้นทดสอบทำการหล่อเย็นเพื่อรักษาอุณหภูมิไว้ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้เกิดการนำความร้อนจากอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ ใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดความแตกต่างของอุณหภูมิ ชิ้นทดสอบจะอยู่ภายในจนวนหุ้มเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน เครื่องทดสอบการนำความร้อน (ดังรูปที่ 3.17) ได้รับจาก ธีรวัฒน์ ลินศิริ และคณะ, 2554



รูปที่ 3.17 เครื่องทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีต

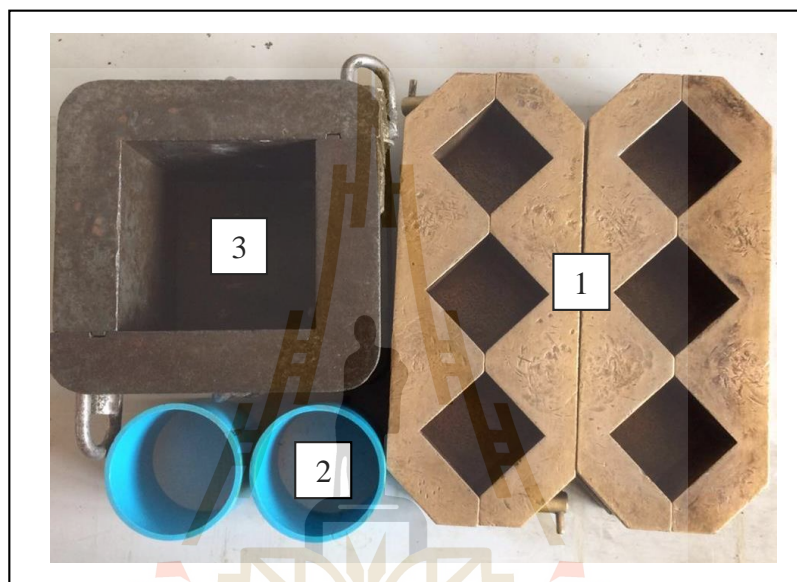
3.3.9 แบบหล่อมาตรฐาน

แบบหล่อมาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบหล่อตามมาตรฐาน BS 1881 แสดงในรูปที่ 3.18 สำหรับขึ้นรูปชิ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ เพื่อใช้ทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อน ประกอบด้วยแบบหล่อ 3 แบบดังนี้

1) แบบหล่อมาตรฐานขนาด 50 mm x 50 mm x 50 mm ทำจากทองเหลือง ใช้สำหรับ
ขั้นรูปขึ้นทดสอบกำลังรับแรงอัด

2) แบบหล่อมาตรฐานขนาด 100 mm x 100 mm x 100 mm ทำจากเหล็กหล่อ ใช้
สำหรับขั้นรูปขึ้นทดสอบการดูดซึมน้ำ

3) แบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 69 mm สูง 75 mm ทำจากท่อพีวีซี ใช้สำหรับ
ขั้นรูปขึ้นทดสอบการนำความร้อน



รูปที่ 3.18 แบบหล่อมาตรฐาน

3.4 ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

3.4.1 การวิเคราะห์ขนาดคละ

โดยทั่วไปคอนกรีตจะประกอบด้วยซีเมนต์และมวลรวมเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งมวลรวมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) หมายถึงมวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 mm และมวลรวมละเอียด (Fine aggregate) หมายถึงมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 mm ตามมาตรฐาน ASTM C33 คอนกรีตประกอบด้วยมวลรวมประมาณร้อยละ 75 ของปริมาตรทั้งหมด ดังนั้นมวลรวมจึงมีความสำคัญต่อคุณภาพของคอนกรีตอย่างมาก การวิเคราะห์ขนาดคละ (Gradation) คือ การวิเคราะห์การกระจายขนาดต่าง ๆ ของอนุภาคมวลรวม โดยการเก็บตัวอย่างมวลรวมมาคัดแยกขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานตามมาตรฐาน ASTM C33 การจัดเรียงตะแกรงร่อนสำหรับมวลรวมละเอียดจะเรียงช่องเปิดขนาดใหญ่อยู่ด้านบนบนสุดและช่องเปิดขนาดเล็กอยู่ด้านล่างสุด กล่าวคือเรียงจากตะแกรงร่อนเบอร์ 4, 8, 16, 30, 40, 50, และ 100 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์ขนาดผลของตัวอย่างด้วยตะแกรงร่อน

การวิเคราะห์ขนาดผลของตัวอย่างด้วยตะแกรงร่อน							
น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 500 g (H)							
ตะแกรงเบอร์	(A) ช่องเปิด ตะแกรง (mm)	(B) น้ำหนัก ตะแกรง (g)	(C) น้ำหนัก ตะแกรง + น้ำหนัก ตัวอย่าง (g)	(D) น้ำหนัก ตัวอย่าง ที่ค้าง ตะแกรง (g)	(E) น้ำหนัก ตัวอย่างที่ ค้าง ตะแกรง (%)	(F) น้ำหนัก ตัวอย่างที่ค้าง ตะแกรง สะสม (%)	(G) เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่าง ที่ผ่าน ตะแกรง (%)
No.4	4.750	B1	C1	D1 = (B1-C1)	E1 = (D1/H)x100	F1 = E1	G1 = (100 - F1)
No.8	2.36	B2	C2	D2 = (B2-C2)	E2 = (D2/H)x100	F2 = E1+E2	G2 = (100 - F2)
No.16	1.18	B3	C3	D3 = (B3-C3)	E3 = (D3/H)x100	F3 = E1+E2+E3	G3 = (100 - F3)
No.30	0.6	B4	C4	D4 = (B4-C4)	E4 = (D4/H)x100	F4 = E1+E2+E3+E4	G4 = (100 - F4)
No.50	0.3	B5	C5	D5 = (B5-C5)	E5 = (D5/H)x100	F5 = E1+E2+E3 +E4+E5	G5 = (100 - F5)
No.100	0.150	B6	C6	D6 = (B6-C6)	E6 = (D6/H)x100	F6 = E1+E2+E3 +E4+E5+E6	G6 = (100 - F6)
pan		B7	C7	D7 = (B7-C7)	E7 = (D7/H)x100	F7 = E1+E2+E3+E4 +E5+E6+E7	G7 = (100 - F7)
						ผลรวมค่า F	

3.4.2 การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ

ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) คือ น้ำหนักของปริมาตรมวลรวมต่อน้ำหนักของน้ำที่ปริมาตรเท่ากัน ตามมาตรฐาน ASTM C128 ดังสมการ 3.1 ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมขึ้นกับส่วนผสมและความพรุน ค่าถ่วงจำเพาะของมวลรวมสามารถแยกได้หลายลักษณะ โดยทั่วไปการออกแบบส่วนผสมจะใช้ค่าความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk specific gravity) ของมวลรวมที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD)

$$S_g = \left(\frac{B}{D + B - C} \right) \quad (3.1)$$

เมื่อ

S_g = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ

B = น้ำหนักของวัสดุอิ่มตัวผิวแห้งชั่งในอากาศ (g)

C = น้ำหนักของวัสดุอิ่มตัวชั่งในน้ำ

D = น้ำหนักของขวดรูปชมพู่ + น้ำหนักน้ำ

3.4.3 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุ

การดูดซึมน้ำ (Water absorption) เป็นสมบัติของวัสดุที่มีช่องว่างหรือโพรงภายในเนื้อจะสามารถดูดซึมน้ำเข้าไปได้ การหาค่าดูดซึมน้ำของมวลรวมเพื่อควบคุมปริมาณน้ำในการผสมให้คอนกรีตมีความชื้นเหลวเหมาะกับการใช้งาน ซึ่งสามารถคำนวณการดูดซึมน้ำจากผลต่างของความชื้นของมวลรวมในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งกับสภาพผิวแห้ง ตามมาตรฐาน C128 ดังสมการ 3.2

$$W_a = \left(\frac{B - A}{A} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ

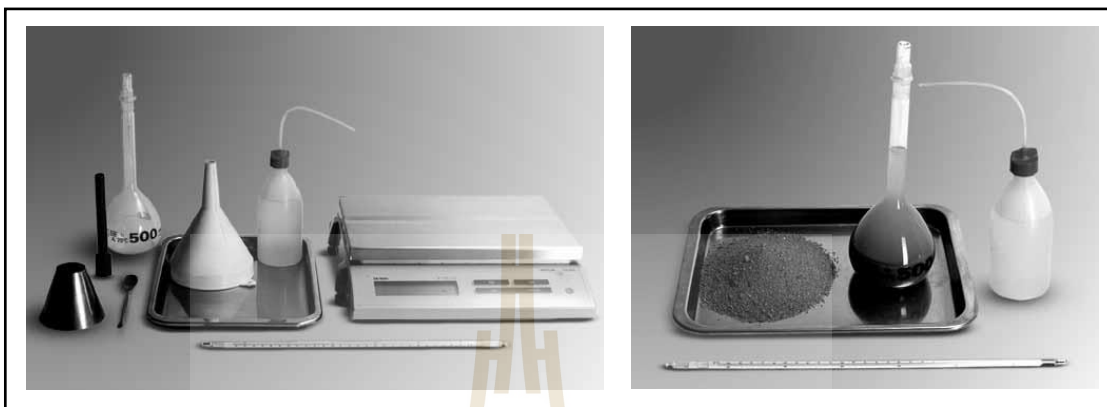
W_a = การดูดซึมน้ำ (%)

B = น้ำหนักของวัสดุอิ่มตัวผิวแห้งชั่งในอากาศ (g)

A = น้ำหนักของวัสดุแห้งชั่งในอากาศ (g)

วิธีการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดตาม ASTM C128 เริ่มจากการเตรียมตัวอย่างโดยใช้ตัวอย่างประมาณ 1,000 กรัม อบให้แห้งจนน้ำหนักคงที่และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ จากนั้นนำทรายไปแช่น้ำจนครบ 24 ชั่วโมง แล้วเทน้ำออก นำตัวอย่างมาผึ่งให้ความร้อนสม่ำเสมอ จนใกล้ถึงจุดอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, SSD) การทดสอบ SSD จะทำการทดสอบตามหัวข้อ 3.2.2 ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ขั้นตอนถัดมาคือวิธีการทดสอบ (รูปที่ 3.20) จะนำตัวอย่างที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งชั่งน้ำหนักประมาณ 500 กรัม บันทึกค่า B แล้วเทลงในขวดรูปชมพู่ (Volumetric Flask) ใช้น้ำฉีดล้างทรายที่ภาชนะลงในขวดให้หมด และเติมน้ำเพิ่มถึงระดับประมาณร้อยละ 90 ของปริมาตรขวด หมุนและเขย่าขวดเพื่อไล่ฟองอากาศ แล้วเติมน้ำจนถึงระดับเป้าหมาย นำไปชั่งบันทึกค่า C ถัดมาเททรายออกจากขวดใส่ถาดแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 °C ทิ้งให้เย็นตัวในอากาศ จากนั้นนำทรายมาชั่งจะได้ค่า A และเติมน้ำในขวด

เปล่าจนถึงระดับเป้าหมายนำไปซึ่งจะได้ค่า D นำไปคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดได้ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ ตัวอย่างการเก็บข้อมูลแสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.20 การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด
แหล่งอ้างอิง: คู่มือการทดสอบหิน ทราย และคอนกรีต ของบริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด (CPAC)

ตารางที่ 3.2 การเก็บข้อมูลในการคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด

Flask No.	สัญลักษณ์	1	2
ปริมาตรของ Flask	V		
น.น.เศษเมลามีน SSD (g)	B		
น.น.Flask + เศษเมลามีน (sat.surf.day) + น.น.น้ำ	C		
น.น.ภาชนะที่ใช้อบแห้ง (g)			
น.น.ภาชนะที่ใช้อบแห้ง + น.น.เศษเมลามีนอบแห้ง (g)			
น.น.เศษเมลามีนอบแห้ง	A		
น.น.Flask + น.น.น้ำ (g)	D		
Bulk specific gravity	$A/(B+D-C)$		
Bulk specific gravity (ssd)	$B/(B+D-C)$		
Apparent specific gravity	$A/(D+A-C)$		
Percent Absorption	$(B-A)/A*100$		

3.5 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

3.5.1 การออกแบบส่วนผสม

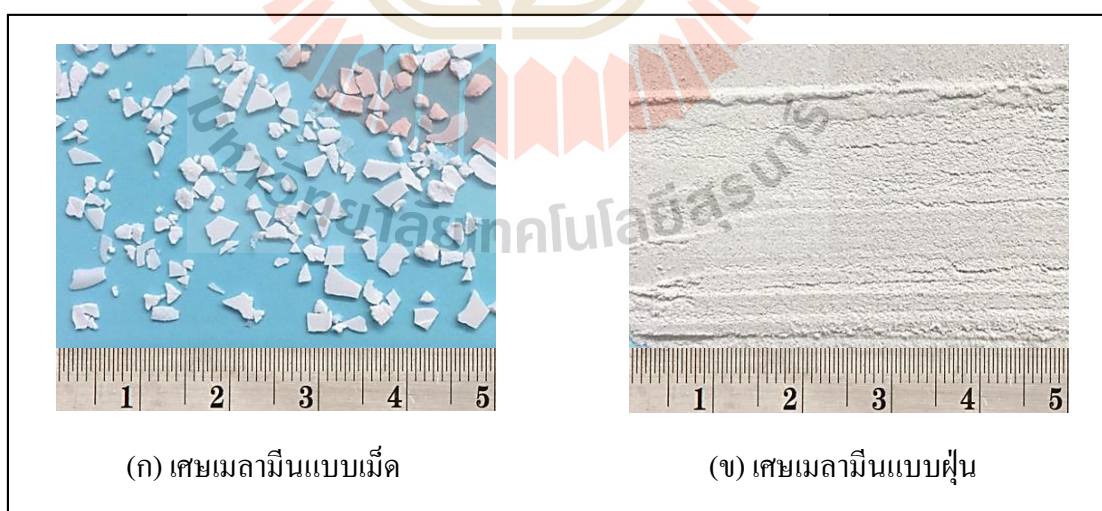
ส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ประกอบด้วย ซีเมนต์ ทราย น้ำ เศษเมลามีน และสารเพิ่มฟอง เศษเมลามีนถูกนำมาใช้ประโยชน์โดยการแทนที่ทรายร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ด้วยเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่น (50:50, 75:25, 85:15 และ 90:10) เป็นมวลรวมละเอียดในคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ทุกสูตรผสมคงที่เท่ากับ 0.5 และควบคุมความหนาแน่นคอนกรีตสดเท่ากับ 1,100 และ 1,300 kg/m³ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

3.5.2 การเตรียมเศษเมลามีน

ในงานวิจัยนี้ใช้เศษเมลามีนสองรูปแบบ คือเศษเมลามีนแบบเม็ดและเศษเมลามีนแบบฝุ่น ซึ่งสามารถเตรียมวัสดุได้ดังต่อไปนี้

1) เศษเมลามีนแบบเม็ด เป็นเศษครีบบเมลามีนที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูปรีออนผลิตภัณฑ์บนโต๊ะอาหารถูกนำมาบดย่อยด้วยเครื่องบดพลาสติกให้มีขนาดเล็กลง ดังแสดงในรูปที่ 3.21(ก)

2) เศษเมลามีนแบบฝุ่น เป็นผงฝุ่นที่ได้จากกระบวนการตัดตกแต่งขอบของผลิตภัณฑ์ถูกนำมาบดด้วยตะแกรงเบอร์ 140 เพื่อคัดแยกสิ่งแปลกปลอมที่ติดมากับเศษเมลามีนแบบฝุ่น ดังแสดงในรูปที่ 3.21(ข)



(ก) เศษเมลามีนแบบเม็ด

(ข) เศษเมลามีนแบบฝุ่น

รูปที่ 3.21 รูปแบบเศษเมลามีน

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์โดยน้ำหนัก

รหัส ชั้นทดสอบ	สัดส่วน (โดยน้ำหนัก)					สารเพิ่ม ฟอง	ความ หนาแน่น (kg/m ³)
	ซีเมนต์	ทราย	เศษ เมลามีน แบบเม็ด	เศษ เมลามีน แบบฝุ่น	น้ำ		
MF0D11	1	1	0	0	0.5	สารเพิ่ม ฟองชนิด สังเคราะห์ ประเภท ประจุลบ สูตร 1	1,100
MFGD11	1	0.75	0.25	0	0.5		1,100
MFGPD11 90:10	1	0.75	0.23	0.02	0.5		1,100
MFGPD11 85:15	1	0.75	0.21	0.04	0.5		1,100
MFGPD11 75:25	1	0.75	0.19	0.06	0.5		1,100
MFGPD11 50:50	1	0.75	0.13	0.12	0.5		1,100
MFPD11	1	0.75	0	0.25	0.5		1,100
MF0D13	1	1	0	0	0.5		1,300
MFGD13	1	0.75	0.25	0	0.5		1,300
MFGPD13 90:10	1	0.75	0.23	0.02	0.5		1,300
MFGPD13 85:15	1	0.75	0.21	0.04	0.5		1,300
MFGPD13 75:25	1	0.75	0.19	0.06	0.5		1,300
MFGPD13 50:50	1	0.75	0.13	0.12	0.5		1,300
MFPD13	1	0.75	0	0.25	0.5		1,300
MF0D11C	1	1	0	0	0.5	สารเพิ่ม ฟองเชิง พอลิซัย	1,100
MFGPD1190:10C	1	0.75	0.23	0.02	0.5		1,100
MFGPD1185:15C	1	0.75	0.21	0.04	0.5		1,100
MF0D13C	1	1	0	0	0.5		1,300
MFGPD1390:10C	1	0.75	0.23	0.02	0.5		1,300
MFGPD1385:15C	1	0.75	0.21	0.04	0.5		1,300

หมายเหตุ : MF0 = คอนกรีตมวลเบาปกติ, MFG = เศษเมลามีนแบบเม็ด, MFGP = เศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่น, MFP = เศษเมลามีนแบบฝุ่น, D = ความหนาแน่น, C = สารเพิ่มฟองเชิงพอลิซัย

3.5.3 การเตรียมโฟม

คอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์เป็นคอนกรีตที่ผสมฟองโฟมเข้าไปเพื่อทำให้น้ำหนักเบาขึ้น ในงานวิจัยนี้จะใช้สารเพิ่มฟอง 2 ยี่ห้อคือสารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1

และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ Tripple trees สารเพิ่มฟองทั้งสองยี่ห้อถูกนำมาเจือจางกับน้ำในอัตราส่วน 1:40 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำสารเพิ่มฟองเจือจางบรรจุลงในเครื่องสร้างฟองโฟม วิธีนี้เป็นวิธีสร้างฟองโฟมด้วยวิธีเชิงกล และอัดอากาศเข้าเครื่องที่ความดัน 0.5 bar เพื่อให้ได้ฟองโฟมขนาดเล็กตั้งแต่ 0.1-1.0 mm ซึ่งความหนาแน่นของฟองโฟมประมาณ 50 kg/m^3 การทำให้สารเพิ่มฟองเจือจางด้วยน้ำกลายเป็นโฟมเหลว (Liquid foam) ก่อนนำไปผสมกับคอนกรีตสดเรียกว่า Pre-formed foam method ตามมาตรฐาน ASTM C796 ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 การเตรียมโฟมแบบ Pre-formed foam method ผสมในคอนกรีตมวลเบา

3.5.4 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

การขึ้นรูปขึ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์เริ่มจากการเตรียมแบบหล่อดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.3.10 ทาสารหล่อลื่นบาง ๆ ที่ด้านในของแบบหล่อ เพื่อความสะดวกในการถอดแบบเตรียมส่วนผสม โดยนำไปผสมในเครื่องผสม (รูปที่ 3.13) เริ่มจากปูนซีเมนต์ ทราย เศษเมลามีน และน้ำ ตามลำดับ เมื่อส่วนผสมเข้ากันแล้วจึงผสมฟองโฟมที่เตรียมไว้ เมื่อผสมได้ความหนาแน่นตามที่กำหนดแล้วจะเทลงแบบหล่อ โดยแบ่งเป็น 2 ชั้น แต่ละชั้นถูกระทุ้งด้วยแท่งพลาสติกอย่างน้อย 35 ครั้ง เพื่อลดช่องว่างในชั้นทดสอบคอนกรีต ภายหลังการกระทุ้งให้เทคอนกรีตใส่ปูนปากแบบหล่อเล็กน้อยแล้วทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง จึงทำการปิดหน้าตัวอย่างให้เรียบ คงคอนกรีตไว้ในแบบหล่อจนแข็งตัวภายใต้อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจะทำการถอดแบบหล่อออก ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

3.5.5 การบ่มชิ้นทดสอบ

เมื่อครบกำหนด 24 ชั่วโมง คอนกรีตถูกถอดออกจากแบบหล่อ ชิ้นทดสอบถูกนำไปบ่มด้วยวิธีป้องกันการสูญเสียน้ำโดยหุ้มชิ้นทดสอบด้วยพลาสติกแรพที่ทำจากพอลิเอธิลีน (Polyethylene) พลาสติกแรพต้องแนบสนิทกับผิวของคอนกรีต (รูปที่ 3.24) เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำภายในคอนกรีต จากนั้นชิ้นทดสอบจะถูกนำไปใส่ถุงพลาสติกปิดปากถุงอีกหนึ่งชั้นแล้วนำไปบ่มในอุณหภูมิห้องจนครบอายุทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM C495



รูปที่ 3.24 การบ่มชิ้นทดสอบด้วยพลาสติกแรพ

3.6 การทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

3.6.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength test) เป็นการทดสอบความแข็งแรงของคอนกรีตด้วยแรงกดอัด ซึ่งทดสอบคอนกรีตมวลเบาขนาด 50 mm x 50 mm x 50 mm ที่มีอายุปมครบ 7, 14, 28 และ 60 วัน ถูกนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ทำการวัดขนาดเพื่อหาพื้นที่หน้าตัด (A) และวางชิ้นทดสอบด้านผิวเรียบทั้งสองฝั่งเข้าเครื่องกดเพื่อหาน้ำหนักกดสูงสุดของชิ้นทดสอบ (P_u) โดยให้แรงกด 1 kN/s (ประมาณ 102.04 kg/s) จนกระทั่งชิ้นทดสอบคอนกรีตเกิดความวิบัติไม่สามารถรับแรงที่สูงขึ้นต่อไปได้ การทดสอบแรงกดตามมาตรฐาน ASTM C109 สามารถคำนวณกำลังรับแรงอัดได้จากสมการ 3.3

$$C_s = \frac{P_u}{A} \quad (3.3)$$

เมื่อ

$$C_s = \text{กำลังรับแรงอัด (kg/m}^2\text{)}$$

$$P_u = \text{น้ำหนักกดสูงสุดของชิ้นทดสอบ (kg)}$$

$$A = \text{พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบที่รับน้ำหนักกด (m}^2\text{)}$$

3.6.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของคอนกรีตมวลเบาตามมาตรฐาน ASTM C642 สามารถทำได้โดยนำชิ้นทดสอบขนาด 100 mm x 100 mm x 100 mm อายุปมครบ 28 วัน แช่น้ำให้ท่วมทั้งชิ้นทดสอบเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดนำขึ้นจากน้ำแล้วใช้ผ้าซับน้ำส่วนเกินบนผิวและชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.01 kg เพื่อหาน้ำหนักเปียก (Wet weight) จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปอบในเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้วนำชิ้นทดสอบออกจากเตาอบไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักแห้ง (Dry weight) จากนั้นนำค่าจากการทดสอบไปคำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาดังสมการที่ 3.4

$$W_a = \frac{W_w - W_d}{W_d} \quad (3.4)$$

เมื่อ

$$W_a = \text{การดูดซึมน้ำ (\%)}$$

$$W_w = \text{น้ำหนักของชิ้นทดสอบเมื่อเปียก (kg)}$$

$$W_d = \text{น้ำหนักของชิ้นทดสอบเมื่อแห้ง (kg)}$$

3.6.3 การทดสอบการนำความร้อน

การนำความร้อน (Heat conduction) เป็นการถ่ายเทความร้อนภายในวัตถุหนึ่ง ๆ หรือวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกันจะถ่ายเทความร้อนจากวัตถุหนึ่งผ่านโดยตรงไปยังวัตถุหนึ่ง ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของพลังงานระหว่างโมเลกุลที่อยู่ติดกัน ทิศทางการถ่ายเทความร้อนจะถ่ายเทจากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ การนำความร้อนมากหรือน้อยของวัตถุขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของวัตถุนั้น ๆ วัตถุที่มีโครงสร้างโมเลกุลหนาแน่นจะนำความร้อนได้มาก วัตถุสามารถนำความร้อนได้ดีหรือไม่ สามารถดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัตถุ

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) สัญลักษณ์ที่ใช้ k เกี่ยวข้องกับความสามารถในการนำความร้อนของแต่ละวัสดุ ในงานวิจัยนี้จะวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา โดยการวัดค่าความแตกต่างของอุณหภูมิในรูปของอัตราปริมาณความร้อนไหลต่อหน่วยเวลาจากจุดหนึ่งถึงจุดหนึ่งต่อพื้นที่หน้าตัดที่ไหลผ่าน มีหน่วยเป็น $W/m K$ หรือ $W/m ^\circ C$

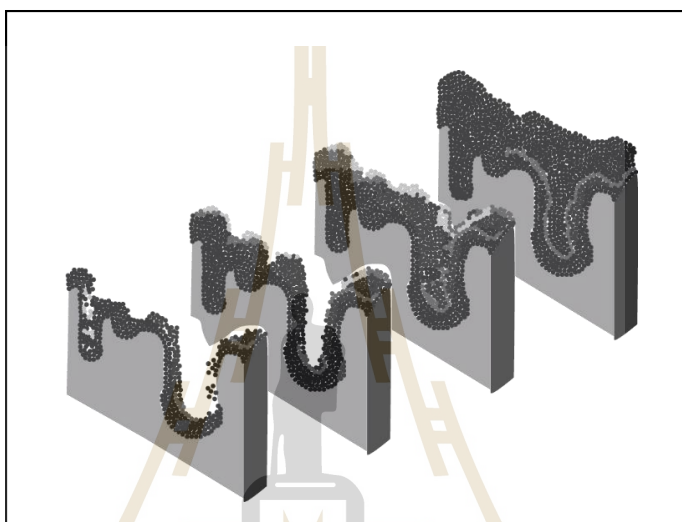
ชิ้นทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 69 mm สูง 75 mm อายุป่ม 28 วันถูกนำมาทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน โดยเริ่มจากการวัดขนาดพื้นที่หน้าตัด (A) ที่สัมผัสกับความร้อน แล้วนำเข้าเครื่องทดสอบการนำความร้อนโดยวางชิ้นทดสอบอยู่ระหว่างแท่งทองแดงสองแท่ง ให้ปริมาณความร้อนไหลผ่านชิ้นทดสอบ Q ด้วยการจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านขดลวดความร้อนบนผิวสัมผัสด้านหนึ่งของแท่งทองแดงที่อยู่ติดกับด้านบนของชิ้นทดสอบ ให้ความร้อนแก่แท่งทองแดงจนมีอุณหภูมิ $60^\circ C$ และผิวสัมผัสอีกฝั่งหนึ่งของชิ้นทดสอบติดกับแท่งทองแดงอีกก้อนหนึ่งที่มีการหล่อเย็นด้วยระบบน้ำหมุนวนเพื่อให้แท่งทองแดงมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อน แล้วทำการวัดอุณหภูมิสองจุดที่มีระยะห่าง (L) เท่ากับ 55 mm เพื่อหาค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ของชิ้นทดสอบ นำค่าที่วัดได้มาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนดังสมการที่ 3.5 ตามมาตรฐาน ASTM E1225

$$k = \frac{QL}{A\Delta T} \quad (3.5)$$

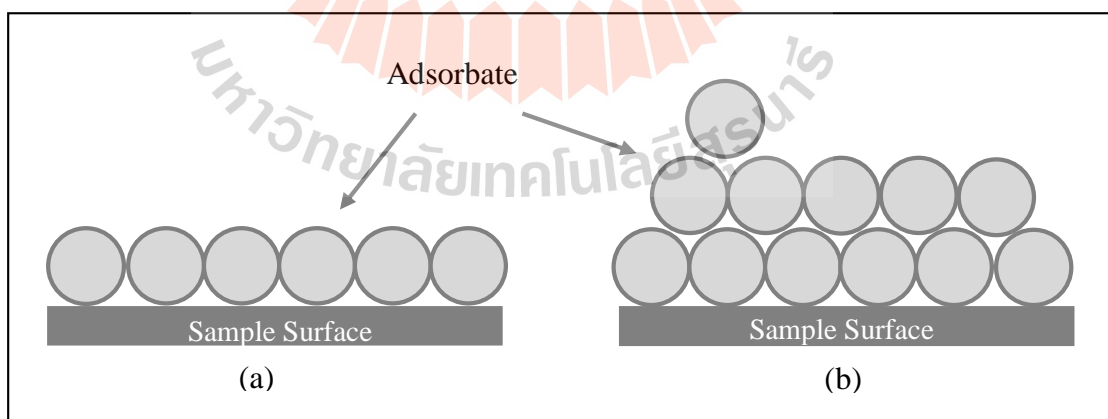
เมื่อ k = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m K$ หรือ $W/m ^\circ C$)
 Q = ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านชิ้นทดสอบ (watt; W)
 A = พื้นที่หน้าตัด (m^2)
 ΔT = ผลต่างอุณหภูมิระหว่างจุดสองจุด (K หรือ $^\circ C$)

3.6.4 การทดสอบความพรุน

การทดสอบความพรุนด้วยวิธี BET (Brunauer Emmett Teller) เป็นการวัดปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับทั้งบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 3.25 ซึ่งแก๊สไนโตรเจนส่วนหนึ่งจะเคลือบบนผิวของวัสดุจับกันเป็นโมเลกุลชั้นที่ 1 จนเต็มพื้นที่ผิวก่อนแล้วไนโตรเจนส่วนที่เหลือจะกระจายไปเคลือบบนโมเลกุลชั้นที่ 1 เป็นโมเลกุลหลายชั้นดังรูปที่ 3.26 (สุพะไชย์ จินดาวุฒิกุล, 2555).



รูปที่ 3.25 การดูดซับแก๊สไนโตรเจนทั้งบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ



รูปที่ 3.26 การดูดซับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนของวัสดุเป็นหลายชั้น

การเตรียมวัสดุในการทดสอบความพรุนต้องทำให้อยู่ในสภาพแห้งและเป็นสุญญากาศ เพื่อให้วัสดุมีโมเลกุลของแก๊สอื่นอยู่ จากนั้นวัสดุจะถูกจุ่มลงในโตรเจนเหลวเพื่อ

ปรับการทดสอบให้อยู่ในอุณหภูมิต่ำ แล้วปล่อยแก๊สในโตรเจนให้วัสดุมีการดูดซับในโตรเจนจนความดันลดลง (P) เทียบกับความดันแก๊สในโตรเจนคงที่ (P_0) จะได้ความดันสัมพัทธ์ $[p/p_0]$ และปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับ (W) แก๊สในโตรเจนถูกปล่อยเข้ามาอีกครั้งจนความดันสัมพัทธ์มีค่าประมาณ $[p/p_0 \cong 1]$ สมการ BET เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับกับความดันสัมพัทธ์ของวัสดุที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 3.6

$$\frac{1}{W \left[\left(\frac{P_0}{P} \right) - 1 \right]} = \frac{1}{W_m C} - \frac{C-1}{W_m C} \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (3.6)$$

เมื่อ W = ปริมาณของแก๊สในโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ (g)
 W_m = ปริมาณของแก๊สในโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวในลักษณะโมเลกุลชั้นเดียว
 P = ความดันของแก๊สในโตรเจนที่ใช้ในการทดลอง (mmHg)
 P_0 = ความดันอิ่มตัวของแก๊สในโตรเจน (mmHg)
 C = ค่าคงที่ของพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ

นอกจากนี้ความสัมพันธ์ของปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับกับความดันสัมพัทธ์ ยังสามารถคำนวณพื้นที่ผิวของวัสดุ S_t ดังสมการที่ 3.7

$$S_t = \frac{W_m N A_{cs}}{M} \quad (3.7)$$

เมื่อ S_t = พื้นที่ผิวของวัสดุ (m^2)
 N = เลขอาโวกราโดร ($6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)
 A_{cs} = พื้นที่หน้าตัดโมเลกุลของแก๊สในโตรเจนที่ถูกดูดซับ ($16.2 \times 10^{-23} \text{ m}^2$)
 M = น้ำหนักโมเลกุลของแก๊สในโตรเจน (28 g/mol)

เมื่อนำค่า S_t ที่คำนวณได้หารด้วยน้ำหนักของวัสดุตัวอย่าง จะได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (S) ในหน่วย m^2/g ดังสมการที่ 3.8

$$S = \frac{S_t}{W} \quad (3.8)$$

เมื่อ $W =$ น้ำหนักของวัสดุ (g)
 $S =$ พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ (m^2/g)

สามารถคำนวณปริมาตรรูพรุนรวม (V_p) ได้ดังสมการที่ 3.9 และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (ϕ_p) ได้ดังสมการที่ 3.10

$$V_p = \frac{W_s}{\rho} \quad (3.9)$$

$$\phi_p = \frac{2V_p}{S_t} \quad (3.10)$$

เมื่อ $V_p =$ ปริมาตรรูพรุนรวมของวัสดุ (m^3)
 $W_s =$ ปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิว (g)
 $\rho =$ ความหนาแน่นของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิว (g/m^3)
 $\phi_p =$ ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (m)



รูปที่ 3.27 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM)

3.7 การวิเคราะห์ระดับจุลภาค

3.7.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM) เป็นอุปกรณ์สำหรับช่วยมองวัตถุที่มีขนาดเล็กเกินกว่าตามนุษย์จะสามารถมองเห็น กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (รูปที่ 3.27) ใช้คลื่นแสงที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นช่อง 400 ถึง 700 นาโนเมตร เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นทำให้ได้ภาพที่มีความคมชัดยิ่งขึ้น ชั้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาถูกตัดกึ่งกลางและขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายเพื่อดูโครงสร้างภายใน นอกจากนี้กล้อง OM ยังสามารถวัดขนาดของช่องว่างอากาศโดยประมาณได้

3.7.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เป็นอุปกรณ์ช่วยในการมองวัตถุที่มีขนาดเล็กในระดับจุลภาค ข้อแตกต่างของกล้อง OM กับกล้อง SEM คือกล้อง OM มีความยาวคลื่นยาวกว่ากล้อง SEM ทำให้กล้อง OM ไม่สามารถขยายวัตถุที่เล็กกว่า 0.2 ไมครอนได้ แต่สำหรับกล้อง SEM ใช้สมบัติคลื่นของอิเล็กตรอนที่มีความยาวคลื่นสั้น มีกำลังขยาย 10-500,000 เท่าและความละเอียดสูง ทำให้กล้อง SEM สามารถแจกแจงรายละเอียดได้ประมาณ 0.2 นาโนเมตร ทำให้ได้ภาพที่คมชัดลึก จึงนิยมใช้ในการศึกษาพื้นฐานและลักษณะพื้นผิวของวัสดุ



รูปที่ 3.27 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ในงานวิจัยนี้ใช้กล้อง SEM รุ่น JSM – 6460LA model Scanning Electron Microscope (JEOL) ดังแสดงในรูปที่ 3.28 สำหรับวิเคราะห์สัณฐาน ลักษณะพื้นผิวของวัสดุและชิ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบา การเตรียมตัวอย่างสามารถทำได้โดยทุบชิ้นทดสอบขนาด 50 mm x 50 mm x 50 mm ให้แตกเป็นชิ้นเล็ก ที่มีขนาดไม่เกิน 5 mm x 5 mm x 5 mm นำชิ้นทดสอบไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิประมาณ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปเข้าเครื่องเคลือบผิวด้วยทองคำหนา 5 นาโนเมตร แล้วนำไปส่องด้วยกล้อง SEM เพื่อถ่ายภาพที่กำลังขยายสูงสำหรับใช้วิเคราะห์ระดับจุลภาค

3.8 การวิเคราะห์การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2³ แฟกทอเรียล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2³ แฟกทอเรียลในงานวิจัยนี้กำหนดปัจจัย 3 ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่งการออกแบบการทดลองเป็นการศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลัก (Main effect) และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction effects) ที่มีผลกระทบต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบา

ตารางที่ 3.4 ปัจจัยและระดับปัจจัย

ปัจจัย (Factor)	รหัส	ระดับของปัจจัย (Level)
อัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น (A)	-1	แทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่นร้อยละ 25 (85:15)
	+1	แทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่นร้อยละ 25 (90:10)
สารเพิ่มฟอง (B)	-1	คอนกรีตมวลเบาผสมสารเพิ่มฟอง ชนิดสังเคราะห์ประเภท 1
	+1	คอนกรีตมวลเบาผสมสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ Tripple trees
ความหนาแน่น (C)	-1	ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาเท่ากับ 1,100 kg/m ³
	+1	ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาเท่ากับ 1,300 kg/m ³

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อนของชิ้นทดสอบคอนกรีตที่มีอายุบ่ม 28 วัน นำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ($\alpha = 0.05$)

3.9 สรุป

ในบทที่ 3 นี้นำเสนอวิธีการดำเนินงานที่อธิบายถึงรายละเอียดการเตรียมวัสดุและเครื่องมือ การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ วิธีการทดสอบ รวมไปถึงวิธีการวิเคราะห์ ทั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบสำหรับศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส ที่นำเศษเมลามีนมาใช้ประโยชน์โดยนำมาแทนที่ทราย เพื่อทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตมวลเบา โดยแบ่งแผนการทดลองออกเป็น 2 แผนดังนี้

แผนการทดลองที่ 1 เป็นการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนร้อยละ 25 ที่อัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่นเท่ากับ 90:10, 85:15, 75:25 และ 50:50 ควบคุมความหนาแน่นคอนกรีตสด 1,100 และ 1,300 kg/m³ ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ การนำความร้อน และทดสอบสัณฐานวิทยา

และแผนการทดลองที่ 2 ผลจากการวิเคราะห์การทดลองที่ 1 จะทำการคัดเลือกสูตรผสมที่ดีที่สุด 2 สูตร เพื่อนำมาผสมกับสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์เปรียบเทียบผลการทดสอบกับสารเพิ่มฟองเดิม ควบคุมความหนาแน่นคอนกรีตสด 1,100 และ 1,300 kg/m³ ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ การนำความร้อน ทดสอบสัณฐานวิทยา ทดสอบปริมาตรรูพรุน และทดสอบทางสถิติ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 บทนำ

การดำเนินงานวิจัยการใช้ประโยชน์เศษเมลามีนเป็นมวลรวมละเอียดในคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ซึ่งได้ทำการแบ่งแผนการดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกเป็นการศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่างเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นเท่ากับ 50:50, 75:25, 85:15 และ 90 :10 ในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ และในส่วนที่สองเป็นการเปรียบเทียบสารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 กับสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ ยี่ห้อ tripple trees โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของคอนกรีตและเปรียบเทียบสารเพิ่มฟอง ดังนั้นในบทนี้จึงจะกล่าวถึงผลการดำเนินงานวิจัยที่สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

- 1) สมบัติของปูนซีเมนต์และมวลรวมละเอียด
- 2) ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ (สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1)
 - ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
 - กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
 - การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
 - การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
 - อัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่นที่ส่งผลดีต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
- 3) ผลการศึกษาการเปรียบเทียบสารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 กับสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์
 - การเปรียบเทียบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
 - การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
 - ผลวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล
 - การเปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
 - ผลวิเคราะห์การดูดซึมน้ำด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

- การเปรียบเทียบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
- ผลวิเคราะห์การนำความร้อนด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล
- สรุปผลการเปรียบเทียบสารเพิ่มฟอง

4.2 สมบัติของปูนซีเมนต์และมวลรวมละเอียด

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 (ข้อมูลอ้างอิงจากผู้ผลิต) มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 2.27 ถึง 22.78 μm ซึ่งขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 7.09 ไมโครเมตร (Chalermchai Chaitongrat and Somsak Siwadamrongpong, 2018)

มวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ทราย เศษเมลามีนแบบเม็ด และเศษเมลามีนแบบฝุ่น ซึ่งผลการวิเคราะห์โมดูลัสความละเอียดหรือขนาดอนุภาค ความถ่วงจำเพาะ และการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดแสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเศษเมลามีนแบบเม็ดมีขนาดใหญ่กว่าทราย เนื่องจากทรายส่วนใหญ่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 100 (ขนาดช่องเปิดของตะแกรง 0.15 mm) ในขณะที่เศษเมลามีนแบบเม็ดส่วนใหญ่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 16 (ขนาดช่องเปิดของตะแกรง 1.18 mm) ในทางกลับกันเศษเมลามีนแบบฝุ่นมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าทราย

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของมวลรวมละเอียด

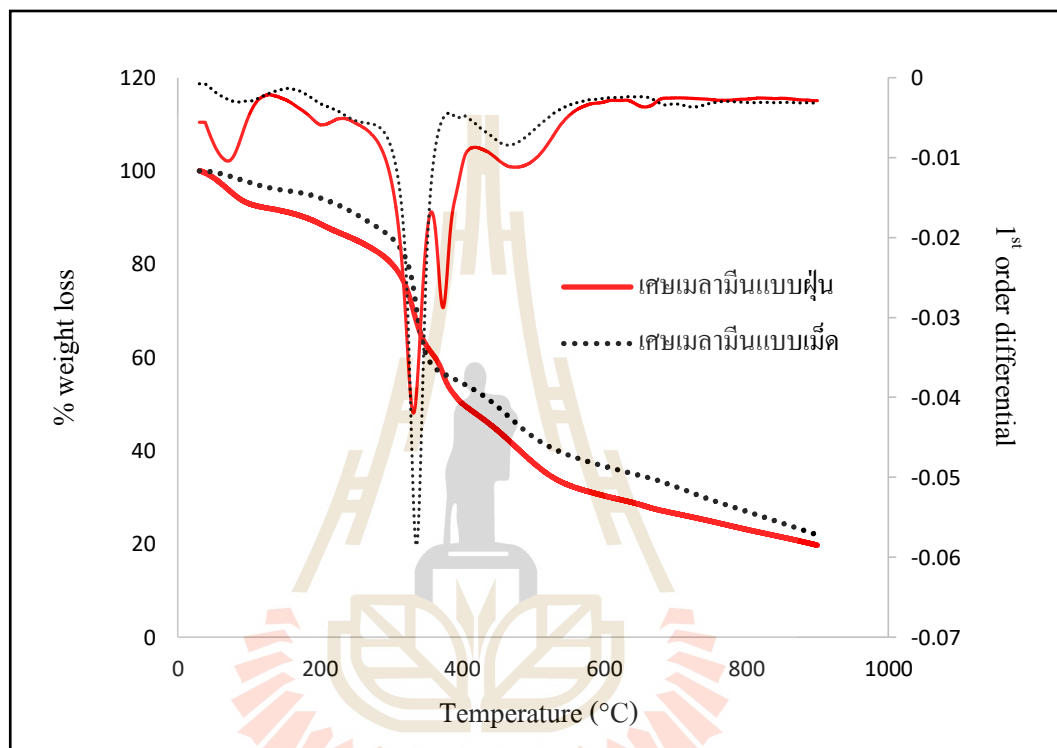
วัสดุ	คุณสมบัติ	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย/ โมดูลัสความละเอียด*	ความถ่วงจำเพาะ	การดูดซึมน้ำ (%)
ทราย		2.28*	2.52**	0.33**
เศษเมลามีนแบบเม็ด		4.53*	1.50**	5.51**
เศษเมลามีนแบบฝุ่น		34 μm **	1.15	157.69

หมายเหตุ * โมดูลัสความละเอียดเป็นค่าบ่งบอกความละเอียดของมวลรวม

**ข้อมูลอ้างอิงจาก (Chalermchai Chaitongrat and Somsak Siwadamrongpong, 2018)

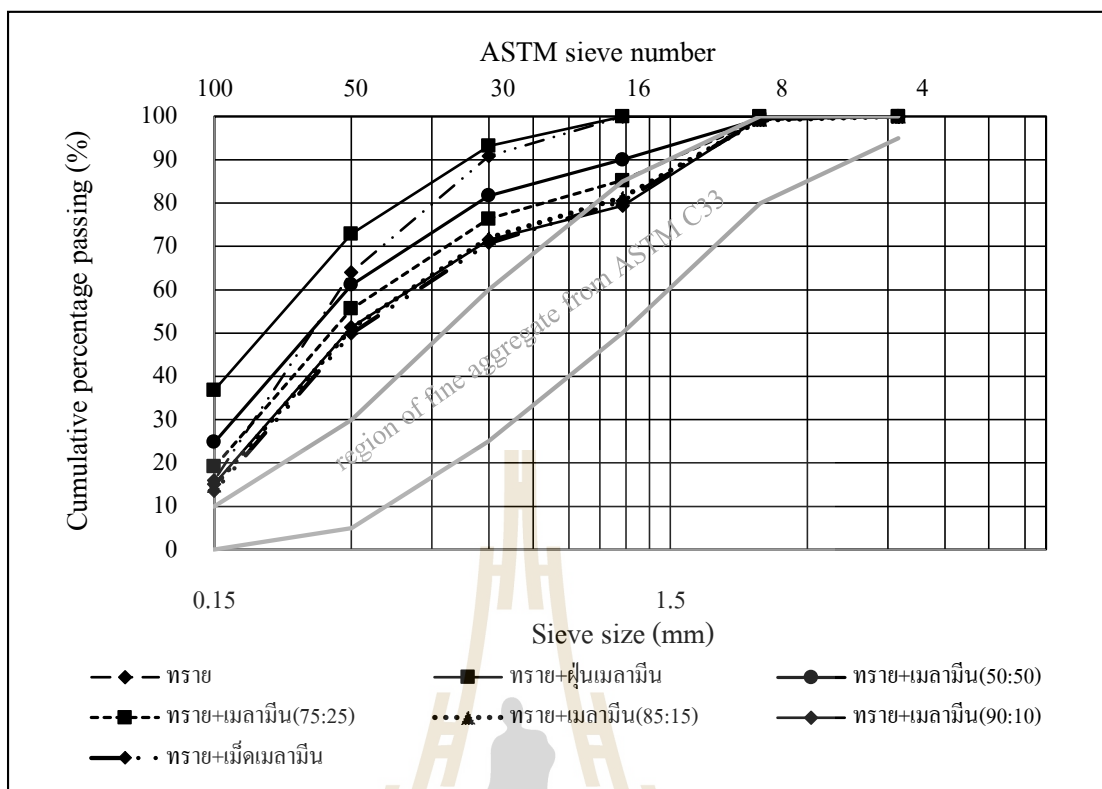
ความถ่วงจำเพาะของเศษเมลามีนแบบฝุ่นมีค่าต่ำกว่าเศษเมลามีนแบบเม็ด คาดว่าเกิดจากส่วนผสมของวัสดุดิบของเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นมีความแตกต่างกัน จึงได้ทำการทดสอบความแตกต่างของส่วนผสมด้วยวิธีการทดสอบ Thermo Gravimetric Analysis (TGA) เป็นการศึกษาการสลายตัวของวัสดุ หลักการทำงานคือทำให้ความร้อนแก่ชิ้นทดสอบจนขึ้นทดสอบเกิดการเสียดสภาพ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำเศษเมลามีนแบบเม็ดและเศษเมลามีนแบบฝุ่นไปทดลองเปรียบเทียบกัน โดยกำหนดอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate) เท่ากับ 5 °C/ นาที และอุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 30 ถึง 900 °C จากผลการทดสอบพบว่าเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นมีร้อยละของ

น้ำหนักที่ลดลง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ มีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เศษเมลามีนแบบฝุ่นมีส่วนผสมที่แตกต่างจากแบบเม็ด ซึ่งอาจเกิดจากเศษเมลามีนแบบฝุ่นได้มาจากกระบวนการจัดตกแต่งผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้แว็กซ์เพื่อขัดเงา มีความเป็นไปได้ว่าเศษเมลามีนแบบฝุ่นอาจมีแว็กซ์ผสมรวมอยู่ ซึ่งแว็กซ์มีความถ่วงจำเพาะที่เบาส่งผลให้เศษเมลามีนแบบฝุ่นมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าเศษเมลามีนแบบเม็ด



รูปที่ 4.1 ผล TGA ของเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่น

ผลการหาขนาดคละของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 ดังแสดงในรูปที่ 4.2 แสดงขนาดคละของทราย และการรวมกันของทรายกับเศษเมลามีน จะเห็นได้ว่าทรายมีอนุภาคค่อนข้างละเอียดเมื่อเทียบกับบริเวณของมวลรวมละเอียด (Region of fine aggregates) ตาม ASTM C33 ในขณะที่การรวมกันของทรายกับเศษเมลามีน (ทรายร้อยละ 75 และเศษเมลามีนร้อยละ 25) ส่งผลให้ขนาดคละของมวลรวมละเอียดเข้าใกล้ปริมาณมวลรวมละเอียดมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการรวมกันของทรายกับเศษเมลามีนแบบเม็ดที่การรวมกันของทรายกับอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น 90:10 และการรวมกันของทรายกับอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น 85:15



รูปที่ 4.2 การรวมกันของมวลรวมละเอียด (ทราย เศษเมลาไมน์แบบเม็ดและแบบฝุ่น)

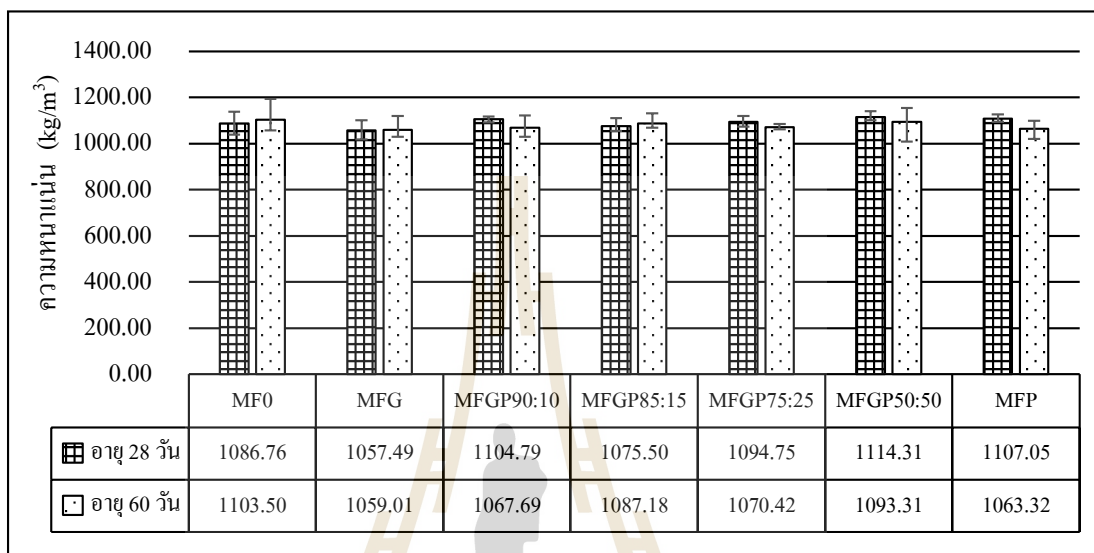
4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนเศษเมลาไมน์แบบเม็ดและแบบฝุ่นต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ (สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1)

4.3.1 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

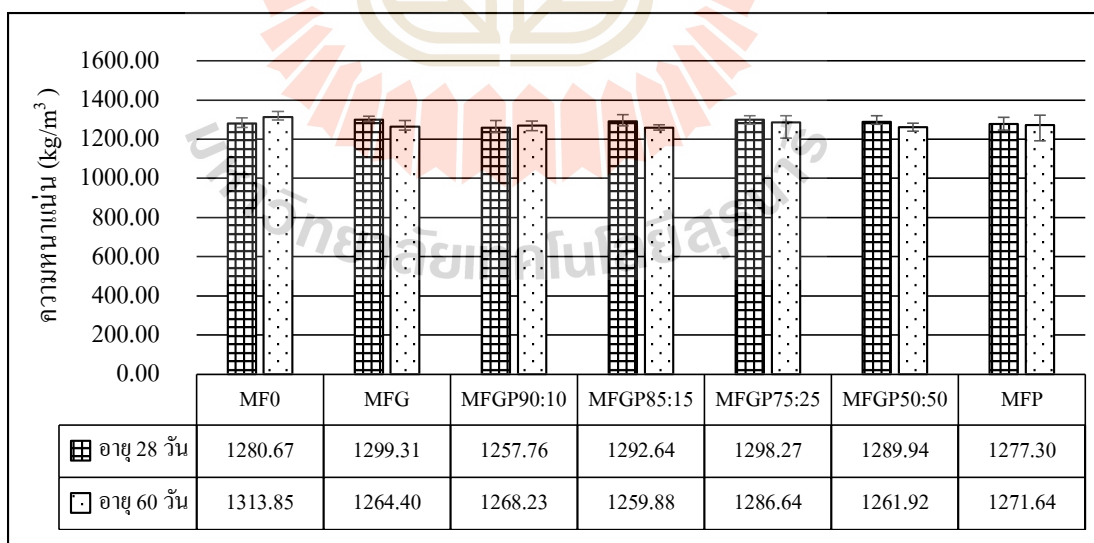
รายละเอียดผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งแสดงในตารางที่ ก.11 ในภาคผนวก ก และค่าเฉลี่ยของผลทดสอบความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน ที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m³ แสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลาไมน์ อายุ 28 วัน มีค่าความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงกับความหนาแน่นของคอนกรีตสด และเมื่อมีอายุครบ 60 วัน จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นแห้งมีค่าลดลงเล็กน้อยเนื่องจากโดยปกติน้ำภายในคอนกรีตจะเกิดการระเหยจากความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2556).

จากการควบคุมความหนาแน่นแห้งตามมาตรฐาน มอก. เลขที่ 2601-2556 พบว่าการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ 1,100 kg/m³ แสดงในรูปที่ 4.3 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลาไมน์อายุ 28 และ 60 วัน พบความแปรปรวนจากการควบคุม

ความหนาแน่นของคอนกรีตสดเล็กน้อย (ไม่เกิน $\pm 50 \text{ kg/m}^3$) และการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ $1,300 \text{ kg/m}^3$ แสดงในรูปที่ 4.4 พบความแปรปรวนจากการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเล็กน้อย (ไม่เกิน $\pm 50 \text{ kg/m}^3$) เช่นเดียวกันคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ กล่าวได้ว่าการควบคุมความหนาแน่นแห่งของคอนกรีตเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.



รูปที่ 4.3 ความหนาแน่นแห่งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเศษเมลามีน
ที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$



รูปที่ 4.4 ความหนาแน่นแห่งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเศษเมลามีน
ที่ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$

การควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเทียบกับความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบามีค่าความแปรปรวนเกิดจากการผสมเศษเมลามีนในคอนกรีตมวลเบา โดยเฉพาะเศษเมลามีนแบบเม็ดที่มีลักษณะเป็นก้อนแบนทำให้การกระจายตัวค้อยกว่าทรายที่มีรูปร่างกลมมน เนื่องจากอนุภาคที่มีรูปร่างกลมมนสามารถกระจายตัวได้ดีและสม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน นอกจากนี้สมบัติการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนยังส่งผลต่อความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาด้วย เนื่องจากเศษเมลามีนที่มีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าทราย ซึ่งส่งผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมมีความแปรปรวน ทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตแปรปรวน

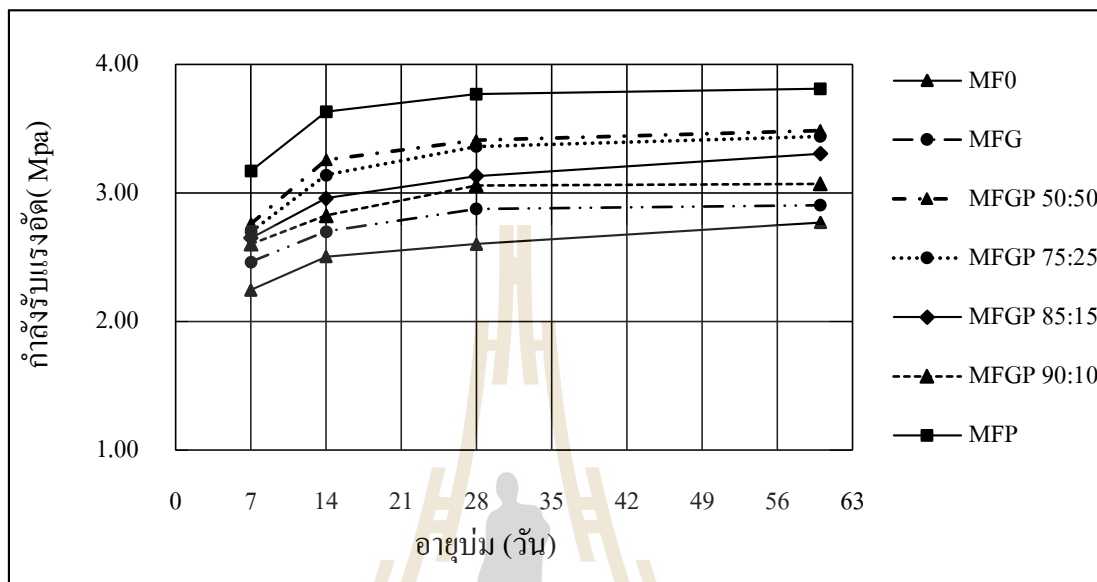
4.3.2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

รายละเอียดผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแสดงในตารางที่ ก.12 ในภาคผนวก ก และค่าเฉลี่ยของผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่อายุบ่ม 7, 14, 28 และ 60 วัน ที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m³ แสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงแรก จากนั้นการพัฒนากำลังรับแรงอัดจะเริ่มคงที่ที่อายุ 28 วัน อันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อน้ำเริ่มทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ คอนกรีตเริ่มแข็งตัวพร้อมทั้งพัฒนากำลังรับแรงอัดอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งไม่มีน้ำเหลือภายในคอนกรีต คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเศษเมลามีนมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสปกติ (MF0) และคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m³ ให้กำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m³

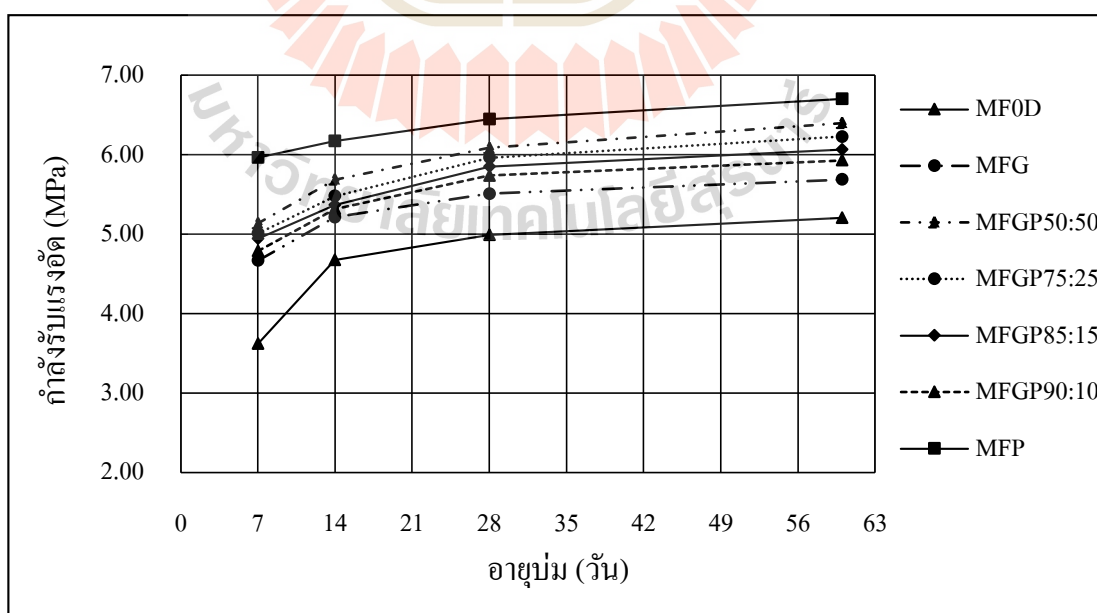
ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่มีอายุ 28 และ 60 วัน ที่ความหนาแน่น 1,000 และ 1,300 kg/m³ แสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการใช้มวลรวมผสมของอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่นในการแทนที่ทราย 25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเศษเมลามีนแบบฝุ่นจาก 10, 15, 25, 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเทียบกับคอนกรีตมวลเบาควบคุม โดยเฉพาะคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเศษเมลามีนแบบฝุ่นเพียงอย่างเดียว (MFP) ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด และคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเศษเมลามีนแบบเม็ดเพียงอย่างเดียว (MFG) ให้กำลังรับแรงอัดต่ำสุดเทียบกับคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเศษเมลามีนสูตรอื่น ๆ ทั้งสองความหนาแน่น

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก. เลขที่ 2601-2556) กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดสำหรับคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,100 kg/m³ อยู่ในเกณฑ์ C12 และคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,300 kg/m³ อยู่ในเกณฑ์ C14 ให้มีกำลังรับ

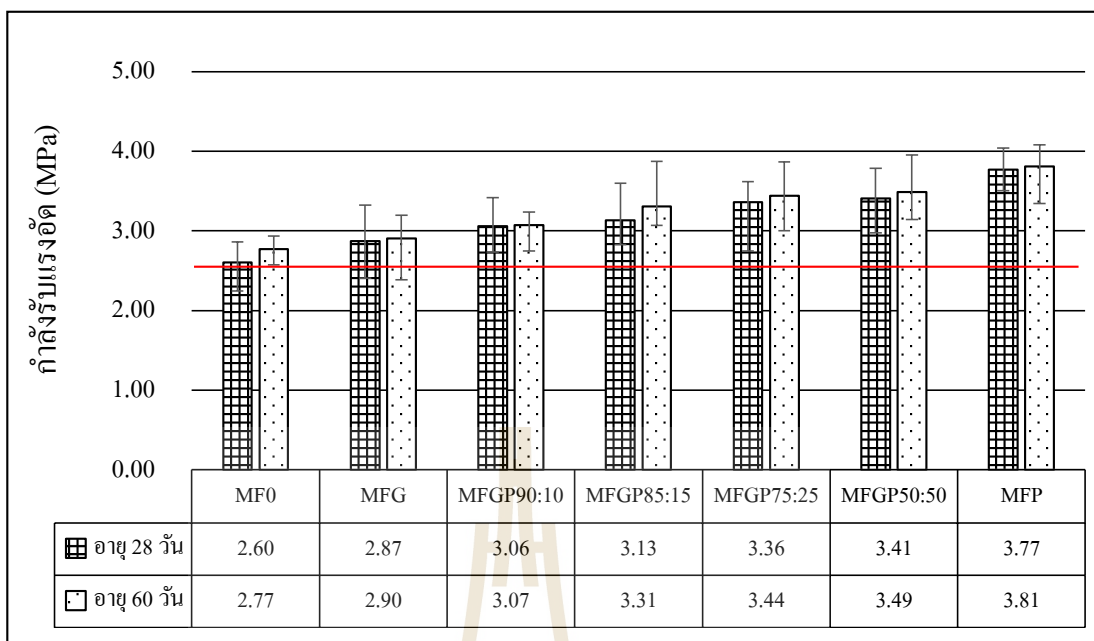
แรงอัดไม่น้อยกว่า 2.5 และ 5.0 MPa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับเกณฑ์ มอก. จะเห็นได้ว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนทุกสัดส่วนผสมสามารถให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ผ่านเกณฑ์ มอก. ทั้งความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m^3 ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



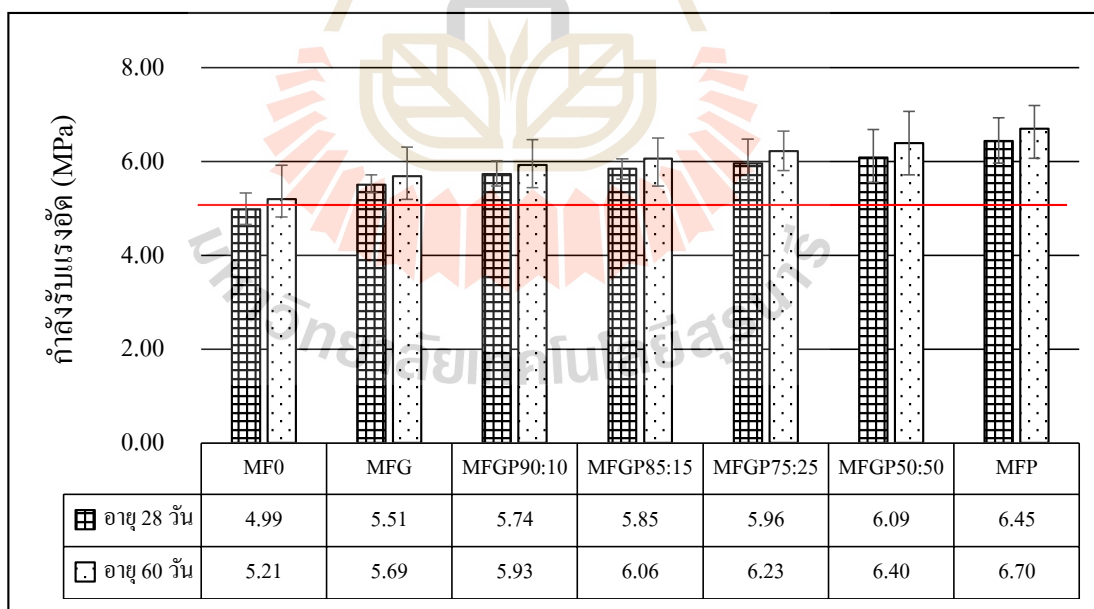
รูปที่ 4.5 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m^3



รูปที่ 4.6 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m^3



รูปที่ 4.7 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ผสมเศษเมลามีน
ที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ (ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน)



รูปที่ 4.8 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ผสมเศษเมลามีน
ที่ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ (ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน)

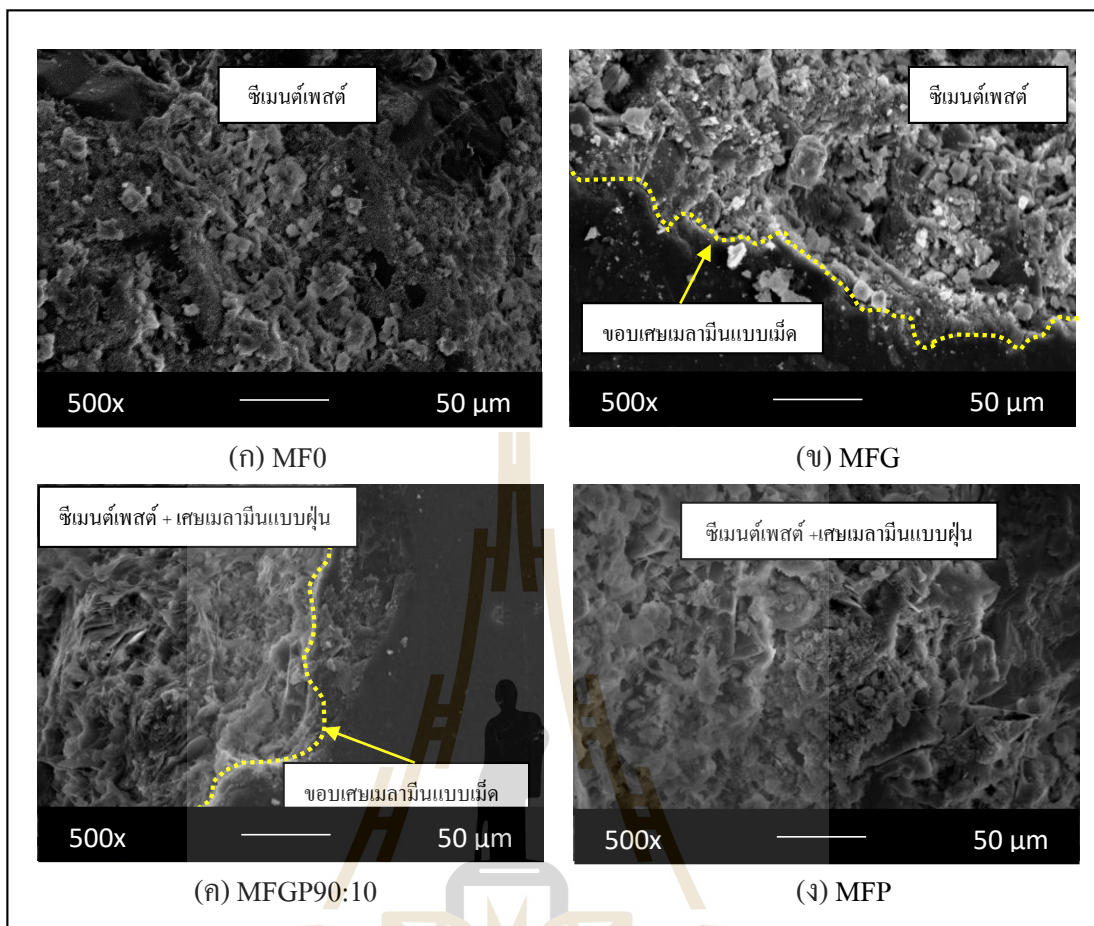
การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่ใช้เศษเมลามีน แทนที่ทรายบางส่วน สามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้

1) ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นเมื่อน้ำสัมผัสกับปูนซีเมนต์ ความสามารถในการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันสามารถเกิดได้ในบริเวณผิวของเศษเมลามีนที่มีปูนซีเมนต์เกาะอยู่ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดจนกระทั่งน้ำภายในคอนกรีตหมดไป ทั้งนี้ความสามารถในการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนยังช่วยดูดซับน้ำส่วนเกินภายในเนื้อคอนกรีตที่เป็นสาเหตุของการเกิดช่องว่าง เมื่อช่องว่างภายในคอนกรีตลดลงเนื้อคอนกรีตจึงอัดตัวแน่นขึ้น ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น

2) การยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพสต์กับเศษเมลามีนสามารถยึดเกาะกันได้ดี อันเนื่องมาจากรูปร่างและผิวสัมผัสของเศษเมลามีน กล่าวคือเศษเมลามีนแบบฟูนมีขนาดอนุภาคเล็กจึงสามารถแทรกตัวในช่องว่างระหว่างวัสดุอื่นได้ดีทำให้คอนกรีตอัดตัวแน่น นอกจากนี้เศษเมลามีนแบบฟูนยังมีผิวสัมผัสขรุขระทั้งอนุภาคจึงมีผิวสัมผัสมากกว่าเศษเมลามีนแบบเม็ดที่มีผิวสัมผัสขรุขระมากเฉพาะในบริเวณขอบ ซึ่งบริเวณผิวขรุขระเป็นบริเวณที่ยึดเกาะกับซีเมนต์เพสต์ได้ดี

การยึดเกาะของเศษเมลามีนกับซีเมนต์เพสต์สามารถเห็นได้จากภาพขยายของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ ด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.9(ข) และ 4.9(ค) พบว่าซีเมนต์เพสต์สามารถยึดเกาะกับเศษเมลามีนแบบเม็ดได้ดี โดยเฉพาะในบริเวณผิวขอบที่ขรุขระ แต่การยึดเกาะของเศษเมลามีนแบบฟูนกับซีเมนต์เพสต์ในรูปที่ 4.9(ง) ไม่สามารถมองเห็นได้ อันเนื่องมาจากเศษเมลามีนแบบฟูนมีขนาดอนุภาคเล็ก เมื่อเปรียบเทียบภาพขยายของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแบบฟูนกับคอนกรีตมวลเบาปกติดังรูปที่ 4.9(ค) จะเห็นได้ว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแบบฟูนมีเนื้อคอนกรีตอัดตัวแน่นกว่า จึงให้กำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเศษเมลามีนแบบเม็ดและคอนกรีตมวลเบาปกติ

3) ขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่ดีสามารถลดช่องว่างภายในคอนกรีตที่เกี่ยวข้องกับการเกาะตัวของคอนกรีตมวลเบาส่งผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีต การรวมกันเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฟูนกับทรายส่งผลให้ขนาดคละดีขึ้น ซึ่งสามารถเห็นได้จากรูปที่ 4.2 โดยเฉพาะการรวมกันของทรายกับเศษเมลามีนแบบเม็ดที่การรวมกันของทรายกับอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฟูน 90:10 และการรวมกันของทรายกับอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฟูน 85:15 ด้วยขนาดคละที่ดีขึ้นจึงส่งผลให้คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติที่ผสมทรายเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.9 ภาพขยายของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่มีความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ ด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

4) เนื้อคอนกรีตและการกระจายตัวของมวลรวมละเอียด สามารถเห็นได้จาก ภาพขยายของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ออปติคัล (OM) ที่กำลังขยาย 10 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ปกติ (MF0) มีเนื้อคอนกรีตค่อนข้างขรุขระและทราย (เฟสสีน้ำตาล) สามารถกระจายตัวได้ดี สำหรับ คอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนแบบเม็ด (MFG) มีเนื้อคอนกรีตที่ขรุขระน้อยกว่า คอนกรีตมวลเบาปกติ และการกระจายตัวของมวลรวมละเอียดทราย (เฟสสีน้ำตาล) ตลอดจนเศษ เมลามีนแบบเม็ด (เฟสสีขาว) กระจายตัวได้ค่อนข้างดีและทั่วทั้งหน้าตัด ในขณะที่คอนกรีตมวลเบา ผสมเศษเมลามีนแบบฝุ่นมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) มากที่สุด แต่จะไม่สามารถเห็น เศษเมลามีนแบบฝุ่นจากภาพได้ จะสังเกตเห็นเฉพาะทราย (เฟสสีน้ำตาล) ที่มีกระจายตัวได้ดีมาก มี การยึดเกาะที่ดีและมีขนาดรูพรุนที่เล็กลง จึงทำให้คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแบบฝุ่นมีกำลัง รับแรงอัดสูงที่สุด



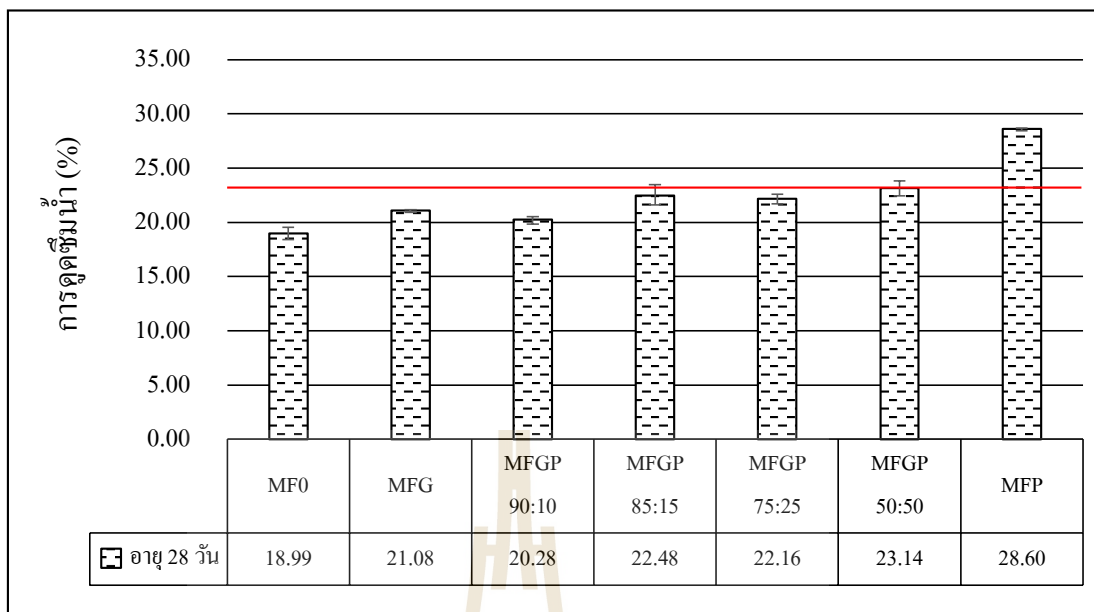
รูปที่ 4.10 ภาพขยายของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ ด้วยกลีง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่า (G = เศษเมลามีนแบบเม็ด)

สำหรับคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่น (MFGP90:10, MFGP85:15, MFGP75:25 และ MFGP50:50) มีเนื้อคอนกรีตที่ขรุขระน้อยกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติและคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแบบเม็ด โดยเฉพาะสูตรการผสมที่มีเศษเมลามีนแบบฝุ่นผสมอยู่มาก จะให้กำลังรับแรงอัดที่สูงเนื่องจากมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น และมีขนาดรูพรุนเล็กกลอง นอกจากนี้การวางตัวของเศษเมลามีนแบบเม็ดส่วนใหญ่จะวางตัวในทิศทางเดียวกันกับการรับแรงกดอัดเสมือนช่วยเสริมสร้างให้คอนกรีตมวลเบาสามารถรับแรงกดอัดได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเศษเมลามีนแบบเม็ดยังคงให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาที่ส่วนผสมของเศษเมลามีนแบบฝุ่น เนื่องมาจากเศษเมลามีนแบบเม็ดมีพื้นผิวสัมผัสสำหรับยึดเกาะของซีเมนต์เพสต์น้อย จึงทำให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันน้อยกว่าเศษเมลามีนแบบฝุ่น

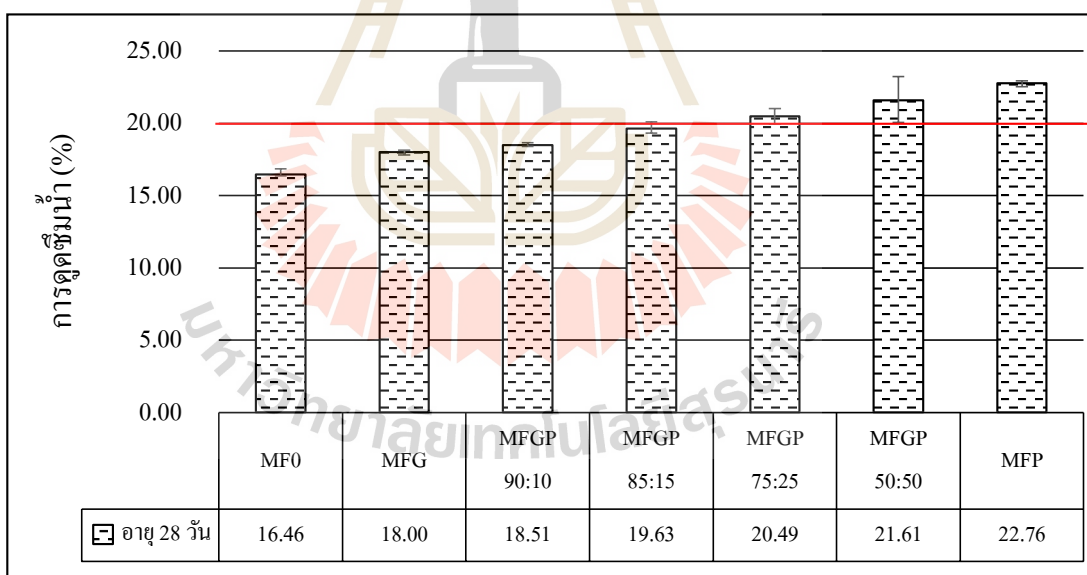
4.3.3 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

รายละเอียดผลการทดสอบการดูดซึมน้ำแสดงในตารางที่ ก.13 ในภาคผนวก ก และค่าเฉลี่ยของผลทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่อายุบ่ม 28 วัน ที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m³ แสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ และมีแนวโน้มดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีสัดส่วนของเศษเมลามีนแบบฝุ่นเพิ่มขึ้น คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแบบฝุ่นมีค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุดทั้งสองความหนาแน่น และคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,100 kg/m³ มีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,300 kg/m³

การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนส่งผลให้คอนกรีตมวลเบามีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ อันเนื่องมาจากคุณสมบัติการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนที่มีค่าสูงกว่าทราย (ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 4.1) โดยเฉพาะเศษเมลามีนแบบฝุ่นที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าทรายและเศษเมลามีนแบบเม็ดจึงสามารถดูดซึมน้ำได้มาก ส่งผลให้การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาสูงขึ้น นอกจากนี้ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา ยังส่งผลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา สำหรับคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีค่าการดูดซึมน้ำสูง เนื่องจากความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาแปรผกผันกับความพรุน กล่าวคือคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีความพรุนสูงเพื่อให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบา น้ำจะแทรกเข้าไปภายในรูพรุนทำให้คอนกรีตมวลเบา มีค่าการดูดซึมน้ำสูงขึ้น



รูปที่ 4.11 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน
ที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$



รูปที่ 4.12 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน
ที่ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก. เลขที่ 2601-2556) กำหนดค่าการดูดซึมน้ำสำหรับคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ อยู่ในเกณฑ์ C12 และคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ อยู่ในเกณฑ์ C14 ที่มีการดูดซึมน้ำ

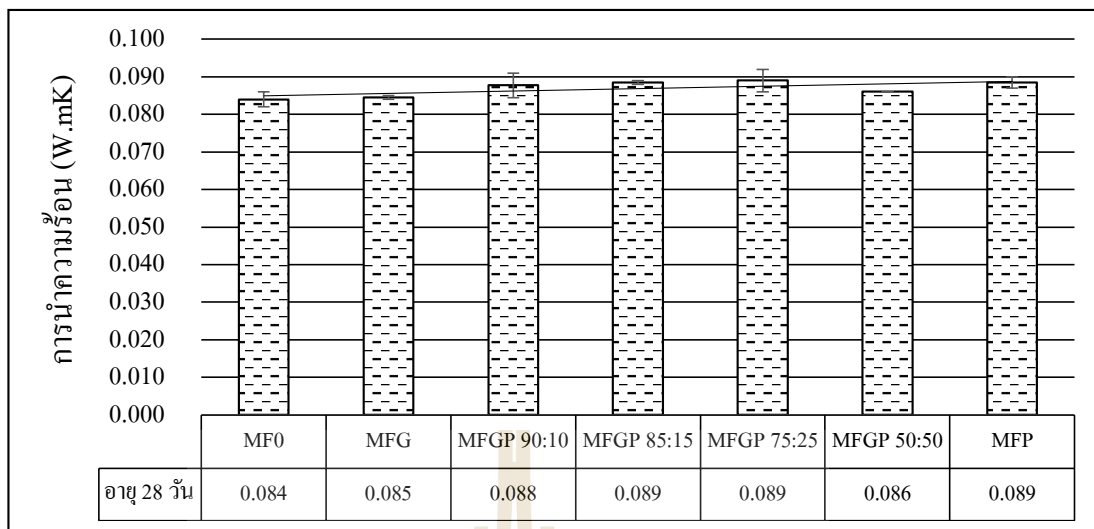
ไม่มากกว่าร้อยละ 23 และร้อยละ 20 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.11 พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งสูตรการผสมที่ผ่านเกณฑ์ มอก. ทั้งหมด 4 สูตรการผสมดังนี้ MFG, MFGP90:10, MFGP85:15 และ MFGP75:25 จากรูปที่ 4.12 พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งสูตรการผสมที่ผ่านเกณฑ์ มอก. ทั้งหมด 3 สูตรการผสมดังนี้ MFG, MFGP90:10 และ MFGP85:15

4.3.4 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

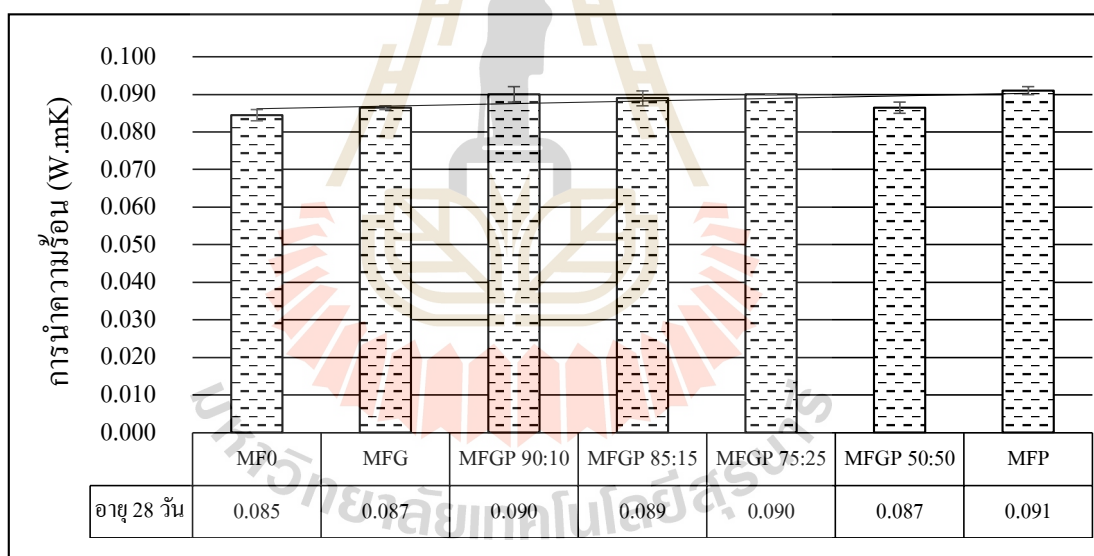
รายละเอียดผลการทดสอบการนำความร้อนแสดงในตารางที่ ก.14 ในภาคผนวก ก. และค่าเฉลี่ยของผลทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน ที่ความหนาแน่น $1,100$ และ $1,300 \text{ kg/m}^3$ แสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ จากผลการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ อาจกล่าวได้ว่าการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนส่งผลต่อการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการแทนที่ของเศษเมลามีนทำให้ขนาดของรูพรุนในคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้เศษเมลามีนมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าทรายจึงสามารถแทรกตัวในช่องว่างได้ดีกว่า กล่าวคือคอนกรีตมวลเบาที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ดังแสดงในรูปที่ 4.12)

จากรูปที่ 4.13 ผลการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนที่มีความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแบบเม็ดมีค่าการนำความร้อนใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาปกติมากที่สุด และคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเศษเมลามีนแบบฝุ่นมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยมากเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ เนื่องจากเศษเมลามีนแบบฝุ่นแทรกตัวในช่องว่างได้ดี ทำให้คอนกรีตยึดเกาะกันแน่น ส่งผลให้ขนาดรูพรุนเล็กลง

จากรูปที่ 4.14 ผลการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนที่มีความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแบบเม็ดมีค่าการนำความร้อนใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติมากที่สุด และคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแบบฝุ่นสูงกว่าเล็กน้อยมากเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติเช่นเดียวกับความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$



รูปที่ 4.13 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน
ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m³



รูปที่ 4.14 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน
ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m³

4.3.5 อัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่นที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่ใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 ที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m³ ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ผู้วิจัยพบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนร้อยละ 25 ให้ค่า

กำลังรับแรงอัดที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ อีกทั้งค่ากำลังรับแรงอัดสามารถผ่านเกณฑ์มอก. เลขที่ 2601-2556 ทั้งสองความหนาแน่น ในทางกลับกันคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่มีค่ากำลังรับแรงอัดและค่าการดูดซึมน้ำผ่านเกณฑ์ มอก. ได้แก่ MFG, MFGP90:10 และ MFGP85:15 ทั้งสองความหนาแน่น การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ เศษเมลามีนส่งผลต่อการนำความร้อนเพียงเล็กน้อยทั้งสองความหนาแน่น

อย่างไรก็ตามวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการมุ่งเน้นใช้ประโยชน์เศษเมลามีนทั้งแบบเม็ดและแบบฝุ่น จึงเลือกศึกษาคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนสูตร MFGP90:10 และ MFGP85:15 นำไปทดลองเพื่อเปรียบเทียบสารเพิ่มฟองสองรูปแบบคือ สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 กับสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ เนื่องจากสารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 จัดทำขึ้นเพื่อใช้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่มีการจัดจำหน่าย จึงทำให้เกิดข้อจำกัดในเรื่องการผลิตคอนกรีตมวลเบาในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นเพื่อให้งานวิจัยนี้สามารถพัฒนาและต่อยอดในการผลิตคอนกรีตมวลเบาเชิงพาณิชย์ได้ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาสารเพิ่มฟองยี่ห้ออื่นเพิ่มเติมให้สามารถใช้งานในการผลิตเชิงพาณิชย์ได้

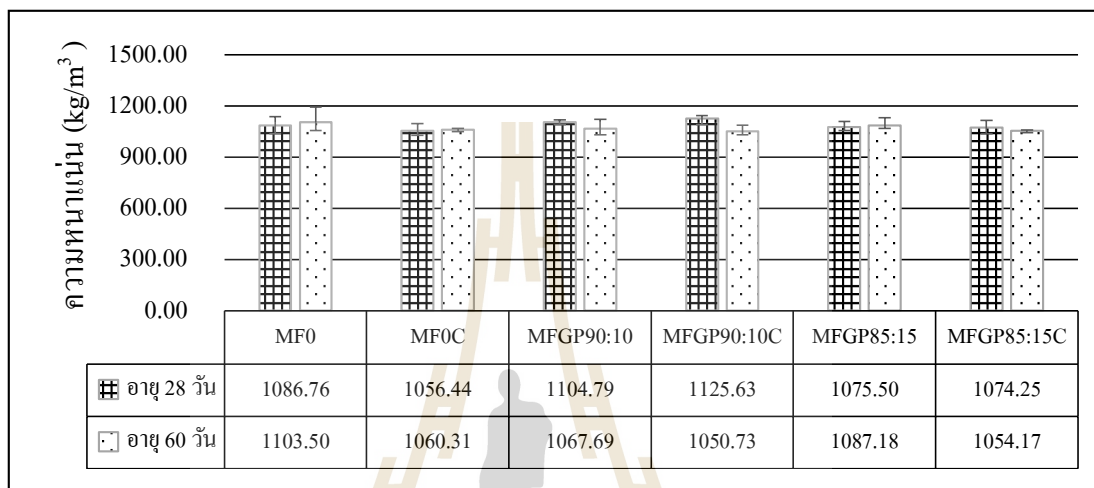
4.4 ผลการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบสารเพิ่มฟองสองยี่ห้อ (สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ tripple tree)

จากผลการศึกษาในหัวข้อ 4.3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนเศษเมลามีนในการแทนที่ทรายบางส่วนในคอนกรีตมวลเบาที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตมวลเบาสามารถรับกำลังรับแรงอัดได้ดีขึ้น มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น และมีค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในหัวข้อนี้จะนำคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนสูตร MFGP90:10 และ MFGP85:15 สำหรับใช้ผสมกับสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของคอนกรีตมวลเบาและใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลในการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ซึ่งมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

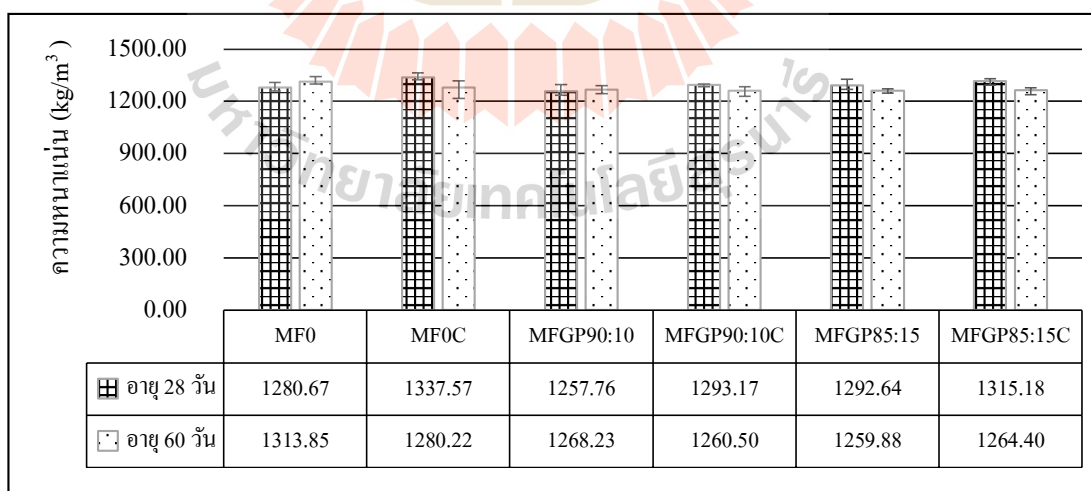
4.4.1 การเปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

รายละเอียดผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์แสดงในตารางที่ ก.11 ในภาคผนวก ก และการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ ที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m³ ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน แสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สาร

เพิ่มฟองเชิงพาณิชย์มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 เล็กน้อย เนื่องจากสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์มีขนาดรูพรุนขนาดเล็กกว่าสารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 รูพรุนสามารถกระจายตัวได้ทั่วทั้งคอนกรีต ทำให้น้ำสามารถรวมกับปูนซีเมนต์และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็วขึ้นเล็กน้อย ส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตลดลง



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองสองยี่ห้อที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m³ (C คือคอนกรีตมวลเบาผสมสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์)



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองสองยี่ห้อที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m³ (C คือคอนกรีตมวลเบาผสมสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์)

จากการควบคุมความหนาแน่นแห้งตามมาตรฐาน มอก. พบว่าการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ $1,100 \text{ kg/m}^3$ แสดงในรูปที่ 4.15 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์อายุ 28 และ 60 วัน มีความแปรปรวนจากการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเล็กน้อย (ไม่เกิน $\pm 50 \text{ kg/m}^3$) ควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ $1,300 \text{ kg/m}^3$ แสดงในรูปที่ 4.16 มีความแปรปรวนจากการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเล็กน้อย (ไม่เกิน $\pm 50 \text{ kg/m}^3$) เช่นเดียวกับคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ กล่าวได้ว่าการควบคุมความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์เป็นไปตามมาตรฐาน มอก.เลขที่ 2601-2556

4.4.2 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

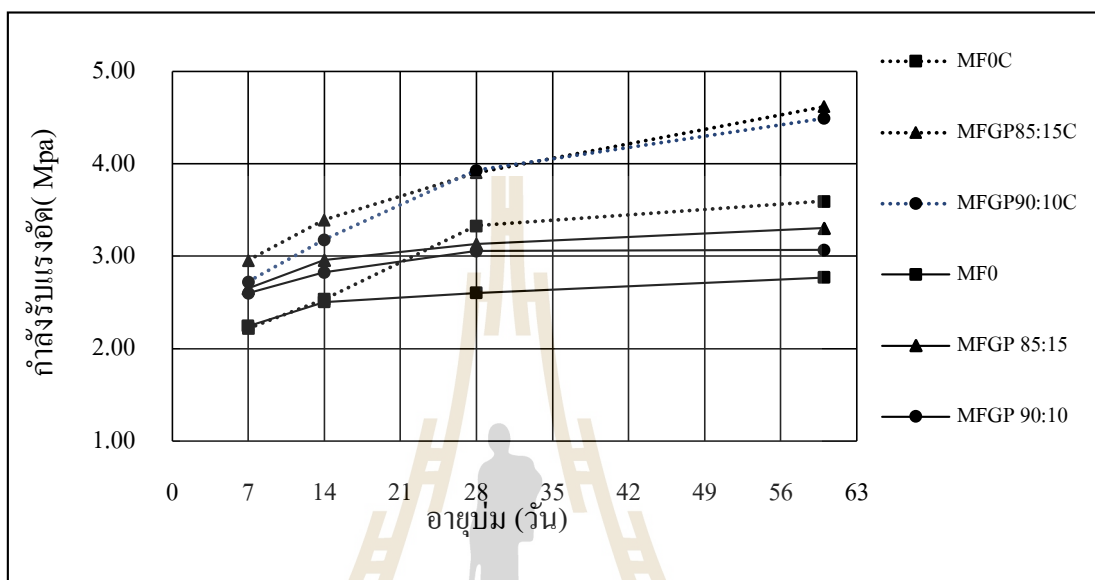
รายละเอียดผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ (Commercial foaming agent) แสดงในตารางที่ ก.12 ในภาคผนวก ก และการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ ที่ความหนาแน่น $1,100$ และ $1,300 \text{ kg/m}^3$ อายุ 7, 14, 28 และ 60 วัน แสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์มีค่าสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1

รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ ที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ อายุ 28 และ 60 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น 85:15 มีค่าสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น 90:10 เล็กน้อย ทั้งสารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์

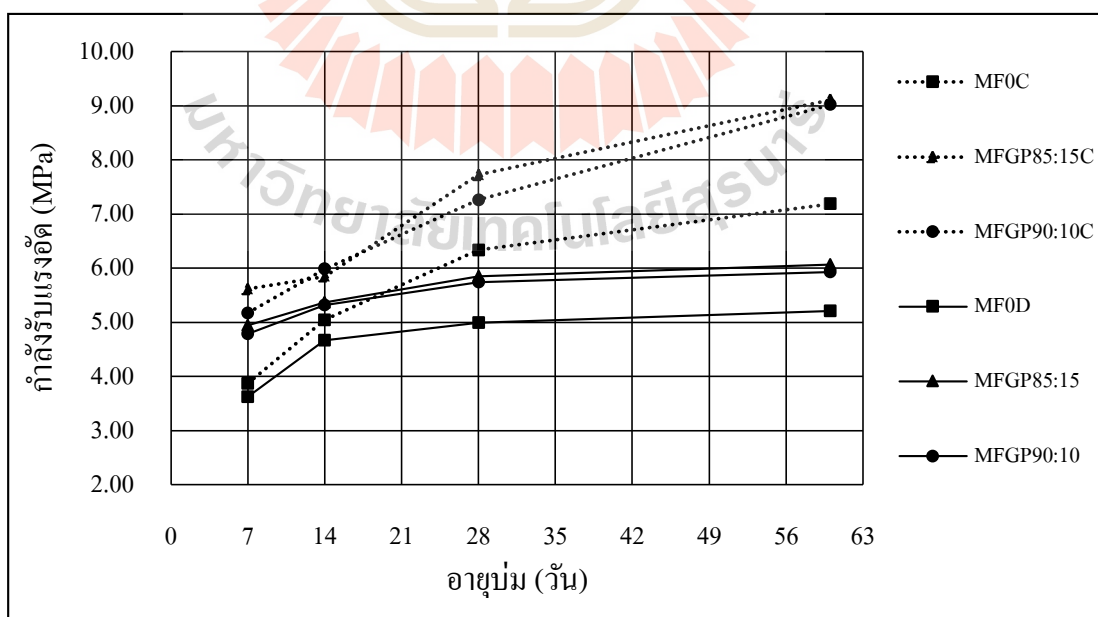
รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ ที่ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ อายุ 28 และ 60 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น 85:15 มีค่าสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น 90:10 เล็กน้อย ทั้งสารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก.เลขที่ 2601-2556) กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดสำหรับคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$

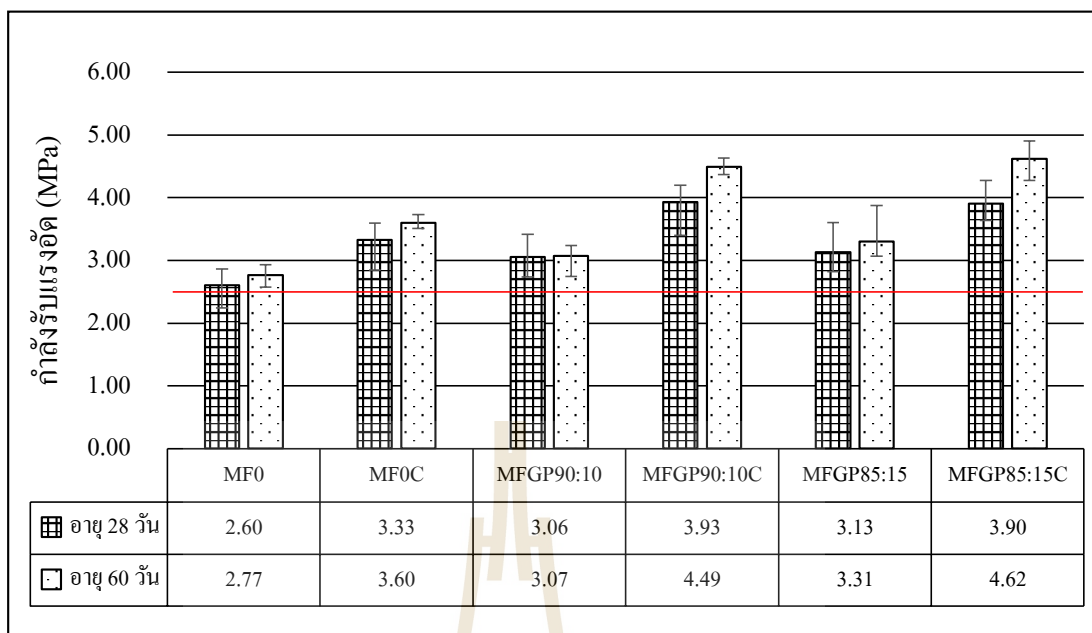
อยู่ในเกณฑ์ C12 และคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ อยู่ในเกณฑ์ C14 ให้มีความกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 2.5 และ 5.0 MPa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในรูปที่ 4.19 และ 4.20 กับเกณฑ์ มอก.พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ผ่านเกณฑ์ มอก. ทั้งความหนาแน่น $1,100$ และ $1,300 \text{ kg/m}^3$



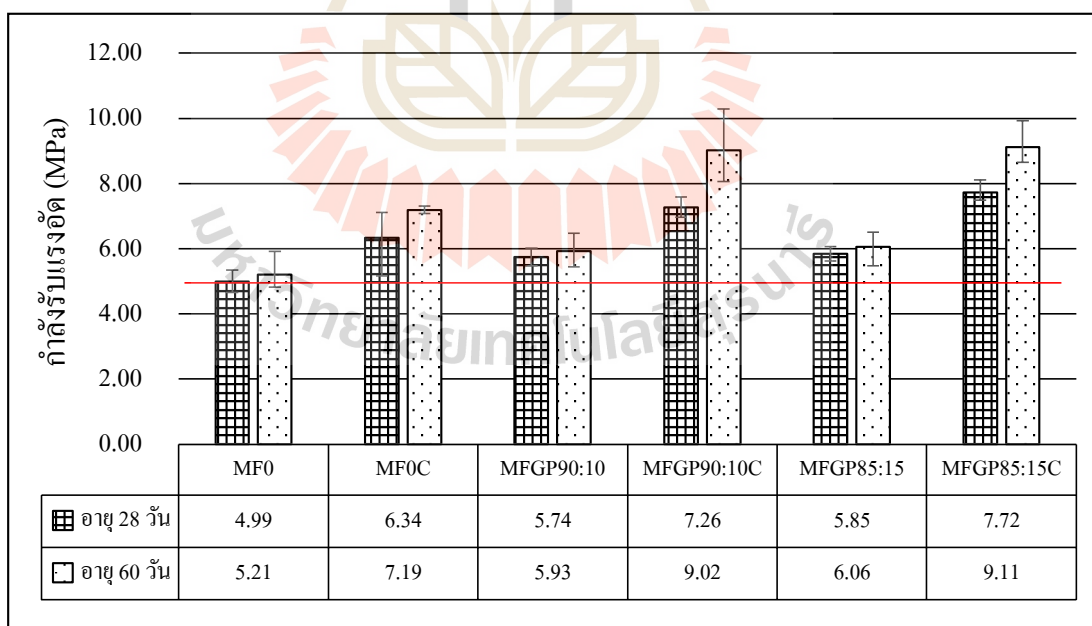
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองสองยี่ห้อที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ (C คือคอนกรีตมวลเบาผสมสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์)



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองสองยี่ห้อที่ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ (C คือคอนกรีตมวลเบาผสมสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์)

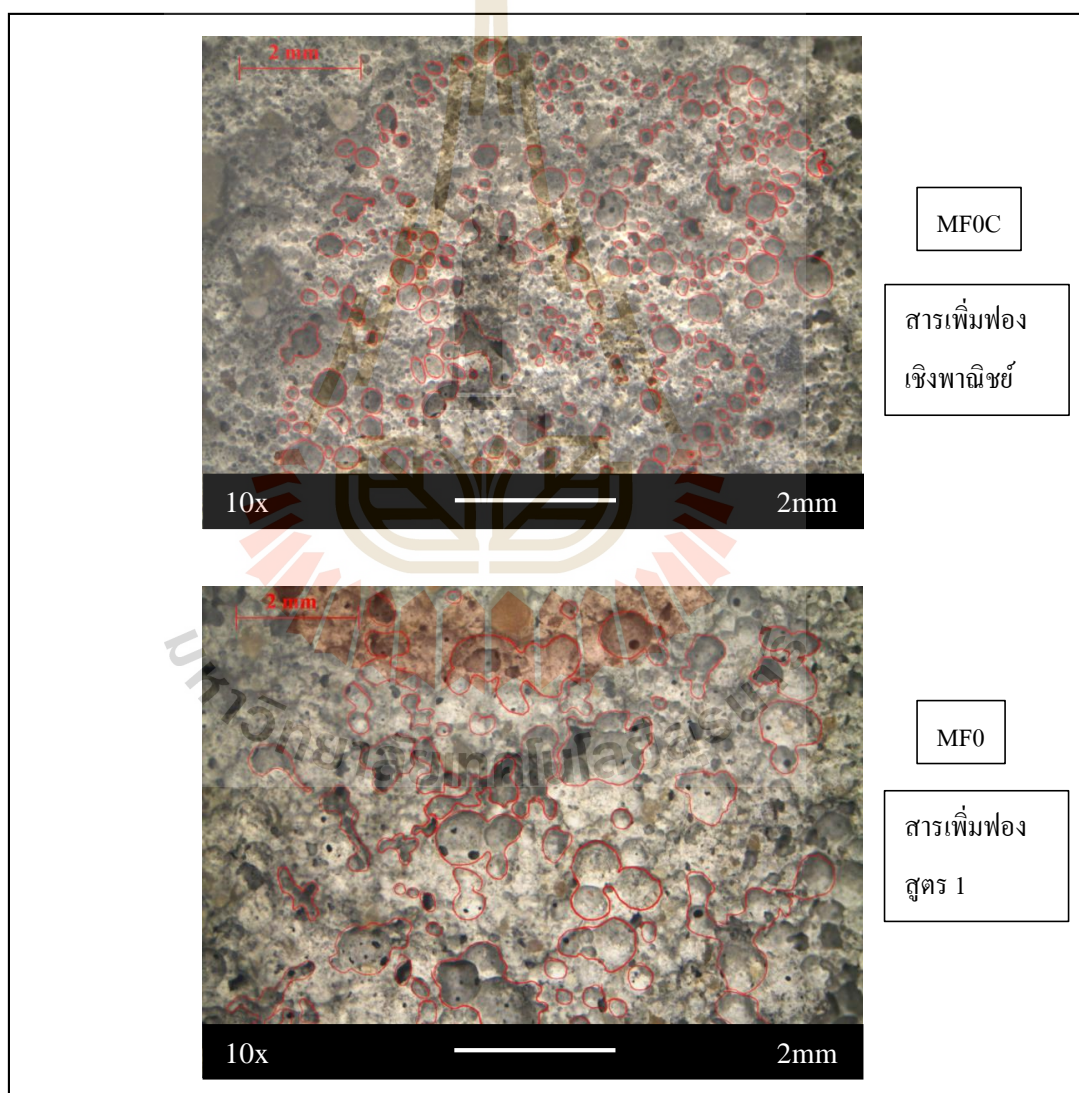


รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองสองยี่ห้อที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ อายุ 28 และ 60 วัน (C คือคอนกรีตมวลเบาผสมสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์)



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองสองยี่ห้อที่ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ อายุ 28 และ 60 วัน (C คือคอนกรีตมวลเบาผสมสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์)

จากการวิเคราะห์ภาพขยายของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใส่สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ ที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ ด้วยก๊อิ่ง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.21 จะเห็นได้ว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใส่สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์มีโพรงอากาศขนาดเล็กที่ไม่ต่อเนื่องกันกระจายตัวทั่วทั้งหน้าตัด แต่คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใส่สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 มีโพรงอากาศขนาดใหญ่ที่เป็นโพรงต่อเนื่องกัน เมื่อโพรงอากาศภายในเนื้อคอนกรีตมวลเบา มีขนาดใหญ่และต่อเนื่องกัน จะทำให้ภายในเนื้อคอนกรีตมวลเบาเป็นโพรงขนาดใหญ่ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง



รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบภาพขยายของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใส่สารเพิ่มฟองสองยี่ห้อที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ ที่กำลังขยาย 10 เท่า (C คือคอนกรีตมวลเบาผสมสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์)

4.4.3 ผลวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

ในงานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k factorial design) เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อผลตอบสนอง (Respond) โดยกำหนดปัจจัย 3 ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับปัจจัย จะได้รับการทดลองทั้งหมด 2^3 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของคอนกรีตทำให้ทราบถึงปัจจัยที่อาจส่งผลต่อคอนกรีตมวลเบา เซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนจากหัวข้อ 4.3 ดังนี้ ปัจจัยที่ 1 อัตราส่วนเศษเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 ซึ่งอัตราส่วนเศษเมลามีนที่ทำการคัดเลือกจากการทดลองก่อนหน้ามา 2 อัตราส่วนคือ เม็ดต่อฝุ่น 85:15 และ 90:10 ที่ให้กำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. กำหนด ปัจจัยที่ 2 สารเพิ่มฟองที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งการทดลองก่อนหน้าใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบสูตร 1 ซึ่งมีข้อจำกัดในเรื่องการใช้งานเชิงพาณิชย์ จึงมีการนำสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์มาใช้เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของคอนกรีตมวลเบา และปัจจัยที่ 3 ความหนาแน่นที่กำหนดตามมาตรฐาน มอก. เลขที่ 2601-2556 ที่สามารถขึ้นรูปขึ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนได้

ตารางที่ 4.2 ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน

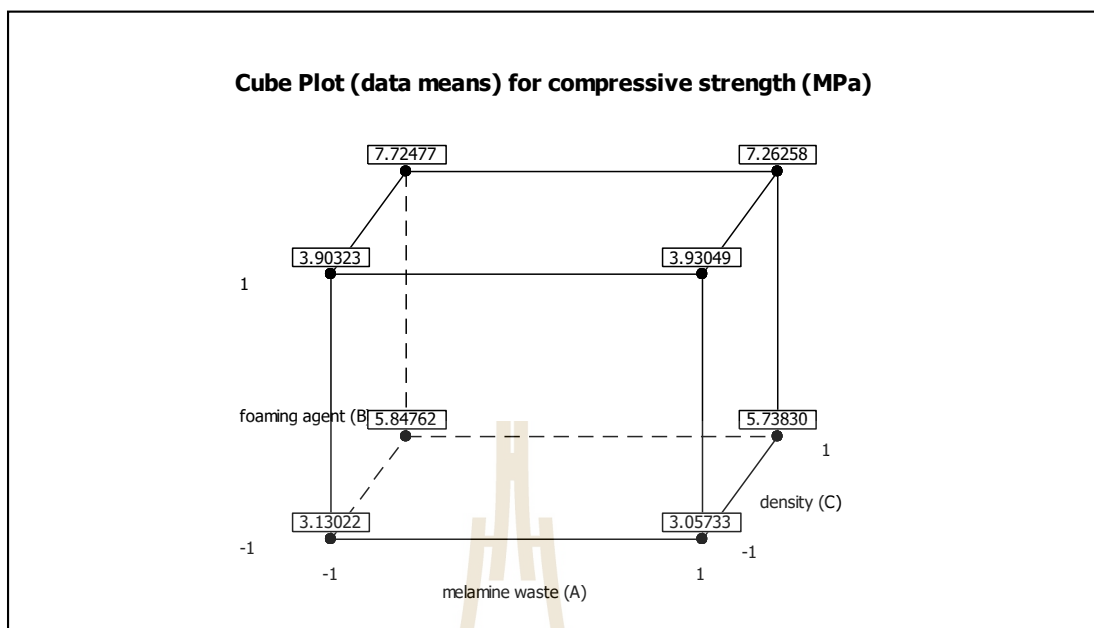
ปัจจัย	รหัส	ระดับของปัจจัย
อัตราส่วนเมลามีน (A)	-1	แทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนร้อยละ 25 (เม็ดต่อฝุ่น 85:15)
	1	แทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนร้อยละ 25 (เม็ดต่อฝุ่น 90:10)
สารเพิ่มฟอง (B)	-1	สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ 1
	1	สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ tripple tree
ความหนาแน่น (C)	-1	ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาเท่ากับ $1,100 \text{ kg/m}^3$
	1	ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาเท่ากับ $1,300 \text{ kg/m}^3$

จากการกำหนดปัจจัยสำหรับการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ ทำการจัดลำดับ (Run) การทดลองแบบสุ่ม (Random) เพื่อลดอคติ (Bias) ของการทดลอง โดยกำหนดการจัดลำดับปัจจัย 3 ปัจจัย ระดับของปัจจัย 2 ระดับ แต่ละครั้งของการทดลองให้มีจำนวนการทดลองซ้ำ (Replicate) 5 ซ้ำ ดังนั้นต้องทำการทดลองทั้งหมด 40 ครั้ง ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลของการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งผู้วิจัยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab Version 16 ช่วยในการคำนวณทางสถิติและวิเคราะห์ผลการทดลอง กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ($\alpha = 0.05$)

จากรูปที่ 4.22 เป็นการเขียนค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนให้อยู่ในรูปทริทเมนต์คอมบิเนชันของแผนการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2³ ของแต่ละปัจจัย

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลของการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีน

รหัส	ระดับของปัจจัย			ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (MPa)					
	อัตราส่วน เมลามีน	สาร เพิ่ม ฟอง	ความ หนาแน่น	การทดลองซ้ำครั้งที่					ค่า เฉลี่ย
				1	2	3	4	5	
MFGPD11 85:15	-1	-1	-1	2.83	2.87	3.60	3.21	3.14	3.13
MFGPD11C 85:15	-1	1	-1	3.67	3.64	3.89	4.28	4.04	3.90
MFGPD11 90:10	1	-1	-1	3.30	3.00	2.83	2.74	3.42	3.06
MFGPD11C 90:10	1	1	-1	4.17	3.40	4.20	3.83	4.06	3.93
MFGPD13 85:15	-1	-1	1	5.94	5.63	5.94	5.68	6.06	5.85
MFGPD13C 85:15	-1	1	1	7.58	7.95	7.50	7.49	8.11	7.73
MFGPD13 90:10	1	-1	1	6.01	5.77	5.69	5.74	5.48	5.74
MFGPD13C 90:10	1	1	1	6.97	7.46	7.58	6.98	7.34	7.27



รูปที่ 4.22 รูปแบบแผนการออกแบบการทดลอง 2^3 แฟกทอเรียล ของการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา

จากรูปที่ 4.23 เป็นการตรวจสอบสมมติฐานขั้นพื้นฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบของส่วนตกค้าง (Residuals) ของผลการทดลอง ความเสถียรภาพของความแปรปรวน การแจกแจงแบบปกติ และความเป็นอิสระของข้อมูล ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ดังนี้

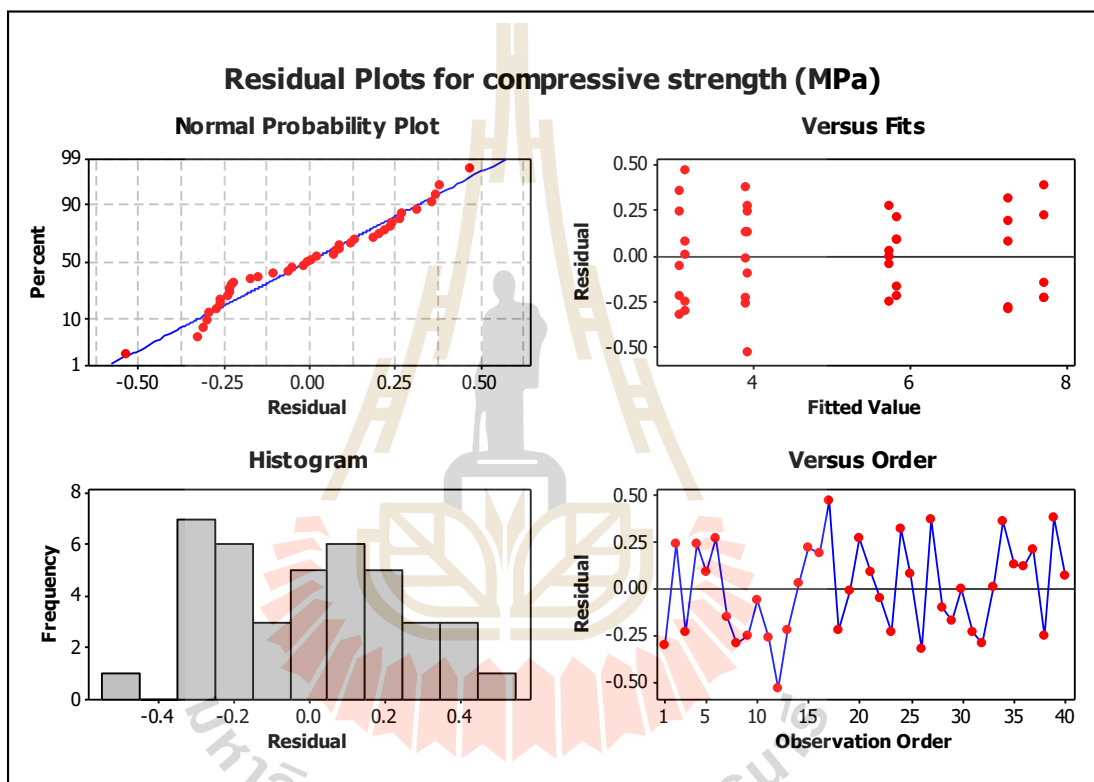
1) การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของความคลาดเคลื่อน (Normal Probability plot) ดังแสดงในรูปที่ 4.23 (บนซ้าย) พบว่าข้อมูลมีแนวโน้มการกระจายตัวแบบปกติ เนื่องจากข้อมูลส่วนใหญ่มีการกระจายตัวไปตามเส้นสมมติฐานใกล้เคียงกับเส้นตรง

2) การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูลด้วยกราฟฮิสโตแกรม (Histogram) ดังแสดงในรูปที่ 4.23 (ล่างซ้าย) พบว่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

3) การตรวจสอบการความเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance stability) ของส่วนตกค้างด้วยการพล็อตกราฟระหว่างความคลาดเคลื่อนกับค่าที่ได้จากการประมาณ (Versus fit) ดังแสดงในรูปที่ 4.23 (บนขวา) พบว่าความแปรปรวนของส่วนตกค้างของแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกัน ไม่มีแนวโน้มและรูปแบบของการกระจายตัว กล่าวคือส่วนตกค้างมีความเสถียรภาพของความแปรปรวน

4) การตรวจความเป็นอิสระของส่วนตกค้างด้วยการพล็อตกราฟระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับที่ (Versus order) ดังแสดงในรูปที่ 4.24 (ล่างขวา) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน กล่าวคือส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระ

จากการตรวจสอบสมมติฐานขั้นพื้นฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา พบว่ามีความเหมาะสมกับรูปแบบของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล



รูปที่ 4.23 Residual plot ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ใช้สำหรับวิเคราะห์แผนการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2³ แฟกทอเรียล เพื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่อาจส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (95%CI) หรือระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ($\alpha = 0.05$) ผลการทดลองที่ได้จะนำค่า P-value เปรียบเทียบกับค่าระดับนัยสำคัญ หากค่า P-value ของปัจจัยใด ๆ น้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ แสดงว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อผลตอบแทนอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงในตารางที่ 4.4 และ

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา

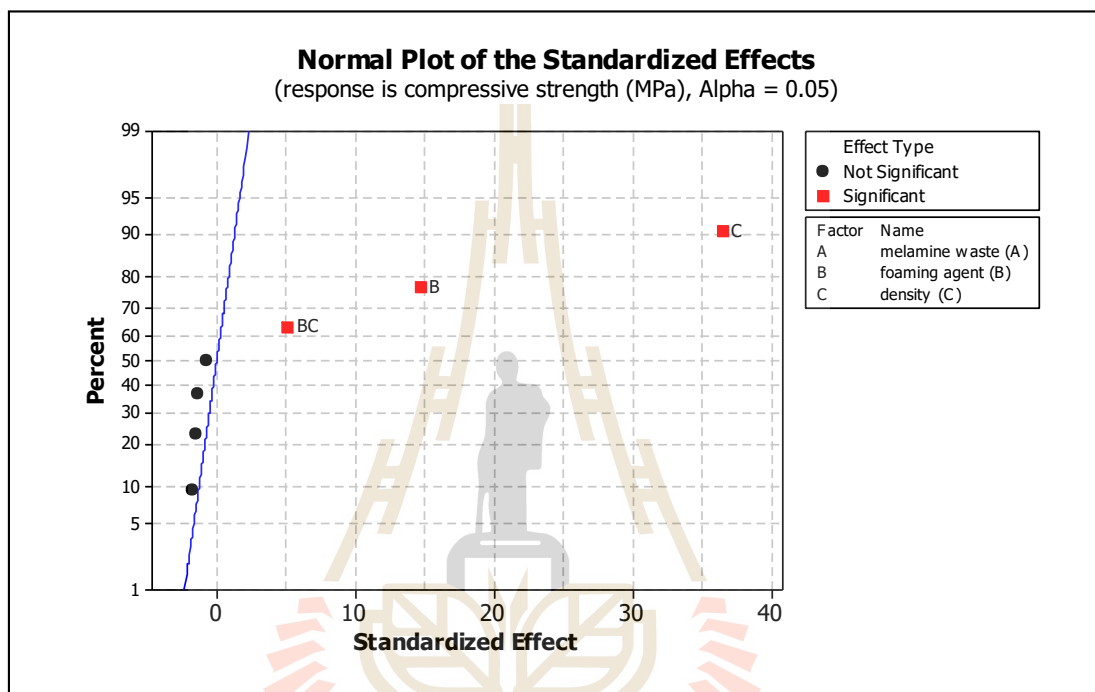
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
ค่าคงที่		5.0743	0.0431	117.80	0.000
อัตราส่วนเศษมวลมีน (A)	-0.1543	-0.0771	0.0431	-1.79	0.083
สารเพิ่มฟอง (B)	1.2619	0.6309	0.0431	14.65	0.000
ความหนาแน่น (C)	3.1380	1.5690	0.0431	36.43	0.000
AB	-0.0632	-0.0316	0.0431	-0.73	0.469
AC	-0.1315	-0.0657	0.0431	-1.53	0.137
BC	0.4388	0.2194	0.0431	5.09	0.000
ABC	-0.1132	-0.5663	0.0431	-1.31	0.198
S=0.272425		R-sq = 98.01%		R-sq (adj) = 97.57%	

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main effect	3	114.632	114.632	38.2107	514.86	0.000
2-way Interactions	3	2.138	2.138	0.7128	9.60	0.000
3-way Interaction	1	0.128	0.128	0.1283	1.73	0.198
Residual Error	32	2.375	2.375	0.0742		
Pure Error	32	2.375	2.375	0.0742		
Total	39	119.274				

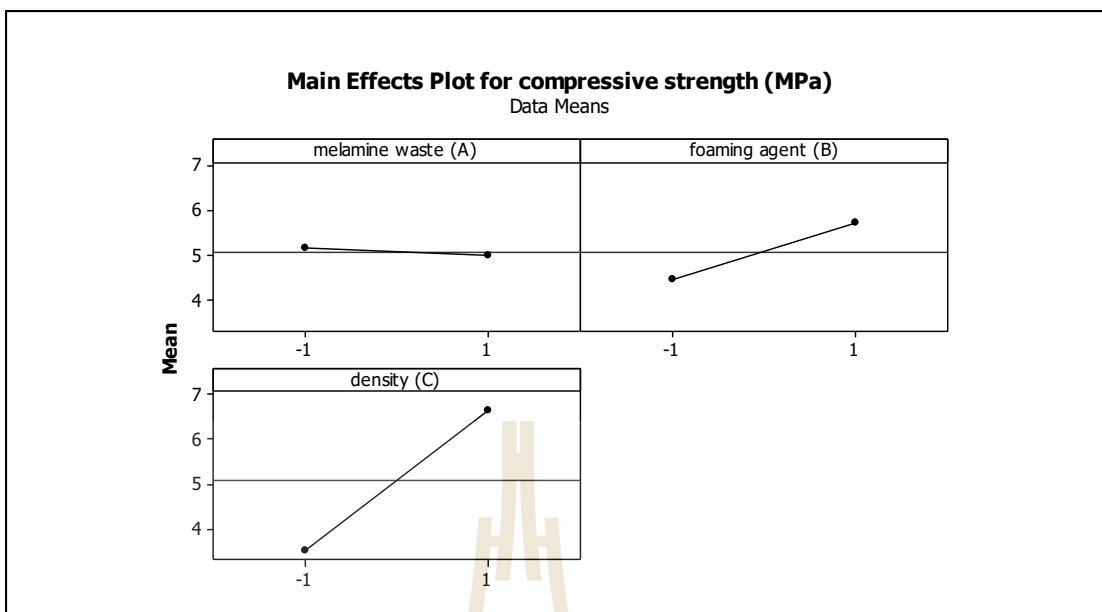
จากตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน พบว่าสารเพิ่มฟอง (B) มีค่า P-value = 0.000 น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าสารเพิ่มฟองมีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอย่างมีนัยสำคัญ และปัจจัยความหนาแน่น (C) มีค่า P-value = 0.000 น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าความหนาแน่นมีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบอิทธิพลร่วมระหว่างสารเพิ่มฟอง (B) กับ ความหนาแน่น (C) มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับรูปที่ 4.24 ที่แสดงให้เห็นว่า

จุดของปัจจัยหลัก B และ C อยู่นอกเส้นสมมติฐานการแจกแจงตัวแบบปกติ และมีจุดของปัจจัยร่วม BC อยู่นอกเส้นเช่นเดียวกัน หมายความว่าปัจจัยดังกล่าวมีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted R-squared; R-Sq (adj)) มีค่าเท่ากับ 97.57% กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงอัด 97.57% เกิดจากปัจจัยศึกษาที่สามารถควบคุมได้ และอีก 2.43% เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ (error)

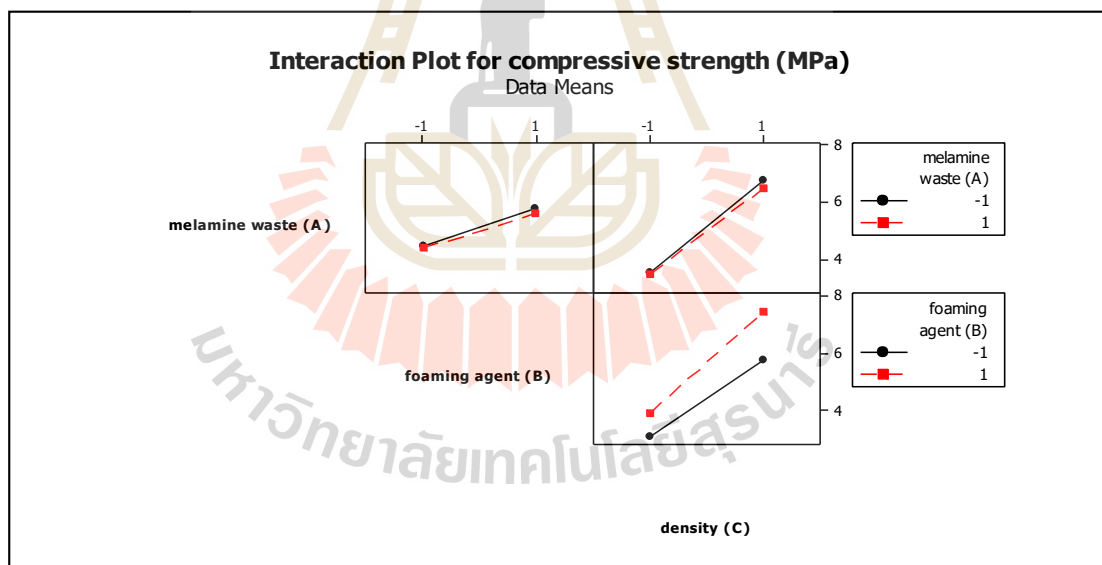


รูปที่ 4.24 ความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าประมาณของอิทธิพลทั้งหมดของการทดสอบกำลังรับแรงอัด

จากรูปที่ 4.25 เป็นการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main effect plot) ประกอบด้วยอัตราส่วนเศษเมลามีน (A) สารเพิ่มฟอง (B) และความหนาแน่น (C) พบว่าอัตราส่วนเศษเมลามีน (A) ไม่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัด กล่าวคืออัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น (85 : 15 และ 90 : 10) ไม่ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเปลี่ยนแปลง และพบว่าสารเพิ่มฟอง (B) และความหนาแน่น (C) มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา โดยความหนาแน่น (C) มีความชันเป็นบวก กล่าวคือเมื่อคอนกรีตมวลเบามีความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ และใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.25 อิทธิพลหลักของปัจจัยต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา



รูปที่ 4.26 อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างสองปัจจัยต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา

จากรูปที่ 4.26 เป็นการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction plot) พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยสารเพิ่มฟองและความหนาแน่น (BC) มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอย่างมีนัยสำคัญ สังเกตได้จากความชันที่แตกต่างกันของแต่ละปัจจัย ซึ่งความชันของอิทธิพลร่วมนี้มีค่าเป็นบวก กล่าวคือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่งหน่วย ทำให้ผลตอบสนองเพิ่มขึ้น

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^3 แฟกทอเรียลสามารถวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยด้วยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง นอกจากนี้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลยังสามารถสร้างสมการแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear regression model) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง โดยพิจารณาจากอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมได้ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1A + \beta_2B + \beta_3C + \beta_4AB + \beta_5AC + \beta_6BC + \beta_7ABC \quad (4.1)$$

โดยที่	Y = ผลตอบสนอง
	A = อัตราส่วนเศษเมลามีน
	B = สารเพิ่มฟอง
	C = ความหนาแน่น
	β_0 = ค่าคงที่สัมประสิทธิ์การถดถอย
	β_1 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยอัตราส่วนเศษเมลามีน
	β_2 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยสารเพิ่มฟอง
	β_3 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยความหนาแน่น
	β_4 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยอัตราส่วนเศษเมลามีนกับสารเพิ่มฟอง
	β_5 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยอัตราส่วนเศษเมลามีนกับความหนาแน่น
	β_6 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยสารเพิ่มฟองกับความหนาแน่น
	β_7 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยอัตราส่วนเศษเมลามีน สารเพิ่มฟอง และความหนาแน่น

การสร้างแบบจำลองสมการถดถอยจะเลือกปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองมาสร้างสมการ ซึ่งการเลือกปัจจัยจะพิจารณาจากค่า P-value (ตารางที่ 4.4) เทียบกับค่าระดับนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) หาก P-value < 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยหรือค่า Coefficient ในตารางที่ 4.4 มาแทนในสมการที่ 4.1 ซึ่งเป็นแบบจำลองการถดถอยแบบเต็มรูปแบบ (Full regression model) ทั้งนี้

ผู้วิจัยทำการตัดปัจจัยบางปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองออก ทำให้ได้แบบจำลองการถดถอย ดังสมการที่ 4.2

$$Y_{cs} = 5.07 + 0.63B + 1.57C + 0.22BC \quad (4.2)$$

ปัจจัยอัตราส่วนเศษเมลามีน (A) ที่ไม่มีอิทธิพลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา กล่าวคือการใช้อัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่นที่อัตราส่วน 85:15 หรือ 90:10 ในการผสมคอนกรีตมวลเบาจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงสามารถเลือกใช้ได้ทั้งสองอัตราส่วน เมื่อตัดปัจจัยนี้ออกจึงไม่ส่งผลกระทบต่อสมการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา

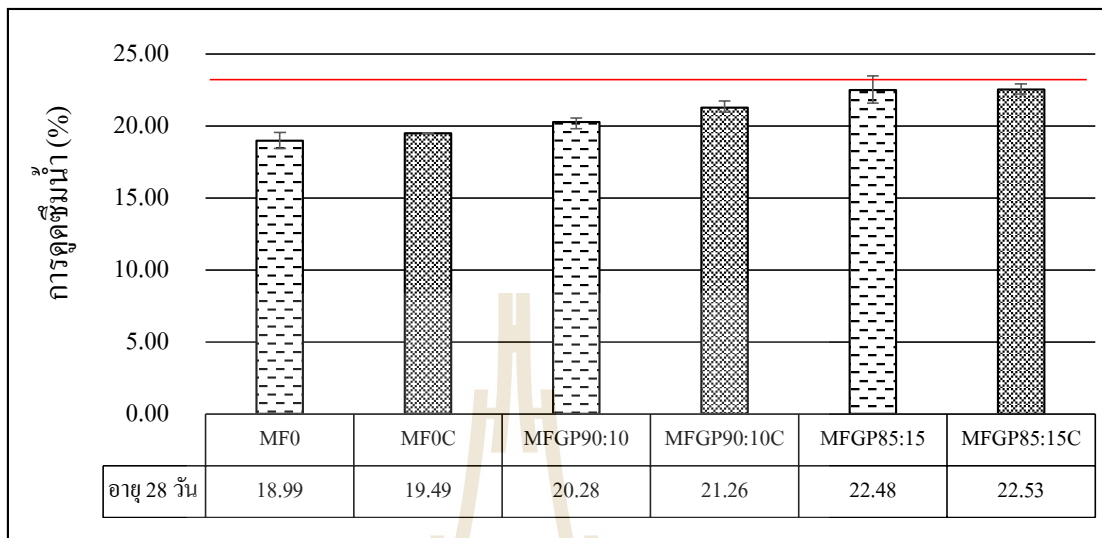
4.4.4 การเปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

รายละเอียดผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์แสดงในตารางที่ ก.13 ในภาคผนวก ก และการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ ที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m³ อายุ 28 วัน แสดงในรูปที่ 4.27 และ 4.28 ตามลำดับ พบว่าค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์มีค่าสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 เล็กน้อย

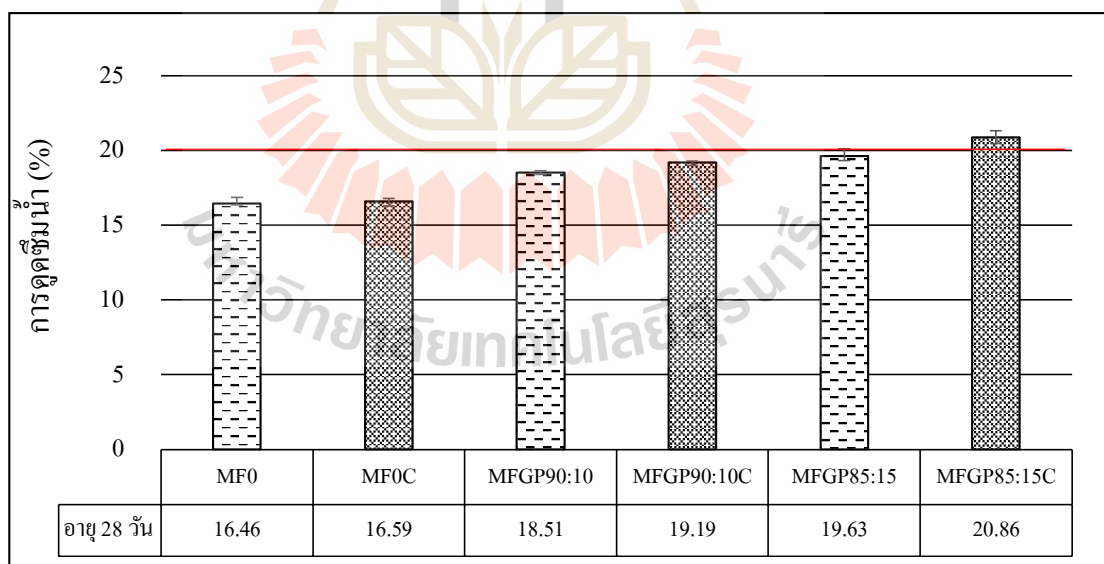
รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m³ อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น 85:15 มีค่าสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น 90:10 เล็กน้อย ทั้งสารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ เนื่องจากอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น 85:15 มีสัดส่วนของเศษเมลามีนแบบฝุ่นมากกว่า ซึ่งเศษเมลามีนแบบฝุ่นมีสมบัติการดูดซึมน้ำมากกว่าทรายและเศษเมลามีนแบบเม็ด จึงส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำสูง

รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m³ อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น 85:15 มีค่าสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น

90:10 เล็กน้อย ทั้งสารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$



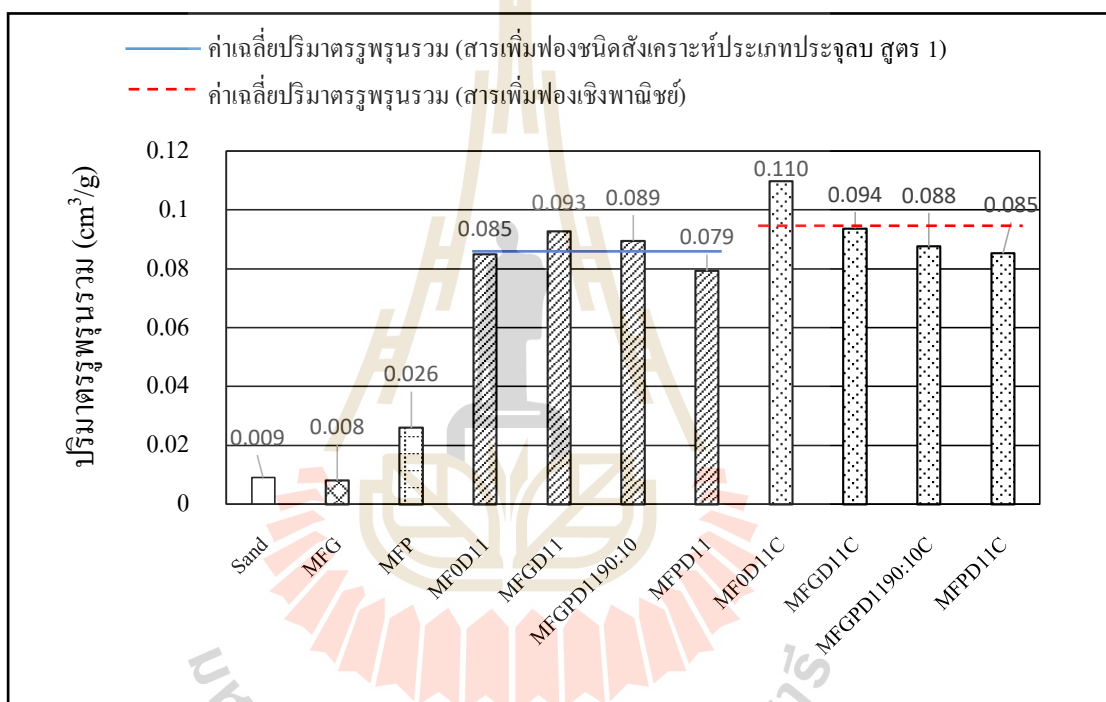
รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองสองยี่ห้อที่มีความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ (C คือคอนกรีตมวลเบาผสมสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์)



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองสองยี่ห้อที่มีความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ (C คือคอนกรีตมวลเบาผสมสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์)

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก. เลขที่ 2601-2556) การกำหนดค่าการดูดซึมน้ำสำหรับคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น

1,100 kg/m³ อยู่ในเกณฑ์ C12 และคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,300 kg/m³ อยู่ในเกณฑ์ C14 ให้มีการดูดซึมน้ำไม่เกิน 23 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในรูปที่ 4.27 และ 4.28 กับเกณฑ์ที่ มอก. กำหนด จะเห็นได้ว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ให้ค่าการดูดซึมน้ำที่ผ่านเกณฑ์ มอก. ทั้งความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m³ การเพิ่มขึ้นของค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์สามารถอธิบายได้ดังนี้ สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์มีค่าเฉลี่ยปริมาตรรูพรุนรวมมากกว่าสารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 ส่งผลให้มีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่า



รูปที่ 4.29 ปริมาตรรูพรุนรวมของวัสดุมวลรวมละเอียดและคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m³

4.4.5 ผลวิเคราะห์การดูดซึมน้ำด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

จากการกำหนดปัจจัยสำหรับการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ ทำการจัดลำดับและการทดลองแบบสุ่มของการทดลองในตารางที่ 4.2 สำหรับแผนการทดลองเชิงแฟกทอเรียลของการทดสอบการดูดซึมน้ำ จะกำหนดการจัดลำดับปัจจัย 3 ปัจจัย ระดับของปัจจัย 2 ระดับ แต่ละครั้งของการทดลองให้มีจำนวนการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ ดังนั้นต้องทำการทดลองทั้งหมด 24 ครั้ง ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลของการทดสอบดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสม

อัตราส่วนเศษเมลามีนแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งผู้วิจัยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab Version 16 ช่วยในการคำนวณทางสถิติและวิเคราะห์ผลการทดลอง กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ($\alpha = 0.05$)

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลของการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีน

รหัส	ระดับของปัจจัย			ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ (%)			
	อัตราส่วน เศษเมลามีน	สารเพิ่ม ฟอง	ความ หนาแน่น	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
MFGPD11 85:15	-1	-1	-1	21.60	23.47	22.37	22.48
MFGPD11C 85:15	-1	1	-1	22.91	22.48	22.22	22.54
MFGPD11 90:10	1	-1	-1	20.49	19.82	20.54	20.28
MFGPD11C 90:10	1	1	-1	20.97	21.09	21.74	21.27
MFGPD13 85:15	-1	-1	1	19.46	19.31	20.11	19.63
MFGPD13C 85:15	-1	1	1	20.78	20.48	21.32	20.86
MFGPD13 90:10	1	-1	1	18.65	18.49	18.39	18.51
MFGPD13C 90:10	1	1	1	19.29	19.01	19.28	19.19

จากรูปที่ 4.30 เป็นรูปแบบการออกแบบการทดลอง โดยการเขียนค่าเฉลี่ยการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนให้อยู่ในรูปทริทเมนต์คอมบินชันของแผนการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^3 แฟกทอเรียลของแต่ละปัจจัย

จากรูปที่ 4.31 เป็นการตรวจสอบสมมติฐานขั้นพื้นฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบของส่วนตกค้างของผลการทดลอง ความเสถียรภาพของความแปรปรวน การแจกแจงแบบปกติ และความเป็นอิสระของข้อมูล ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ดังนี้

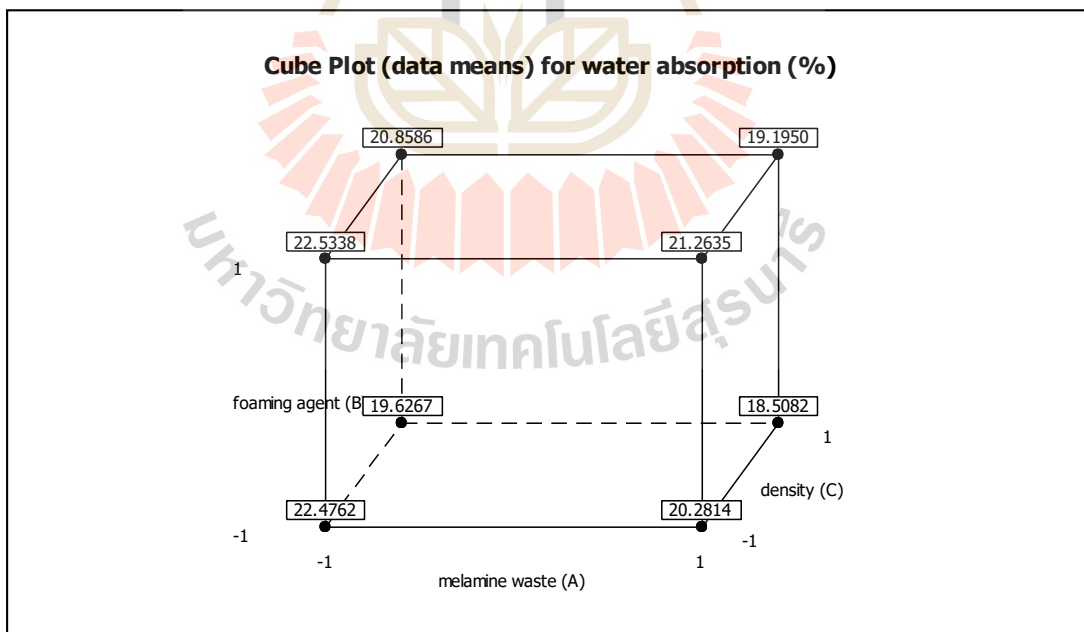
1) การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของความคลาดเคลื่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.31 (บนซ้าย) พบว่าข้อมูลมีแนวโน้มการกระจายตัวแบบปกติ เนื่องจากข้อมูลส่วนใหญ่มีการกระจายตัวไปตามเส้นสมมติฐานใกล้เคียงกับเส้นตรง

2) การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูลด้วยกราฟฮิสโตแกรม ดังแสดงในรูปที่ 4.31 (ล่างซ้าย) พบว่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

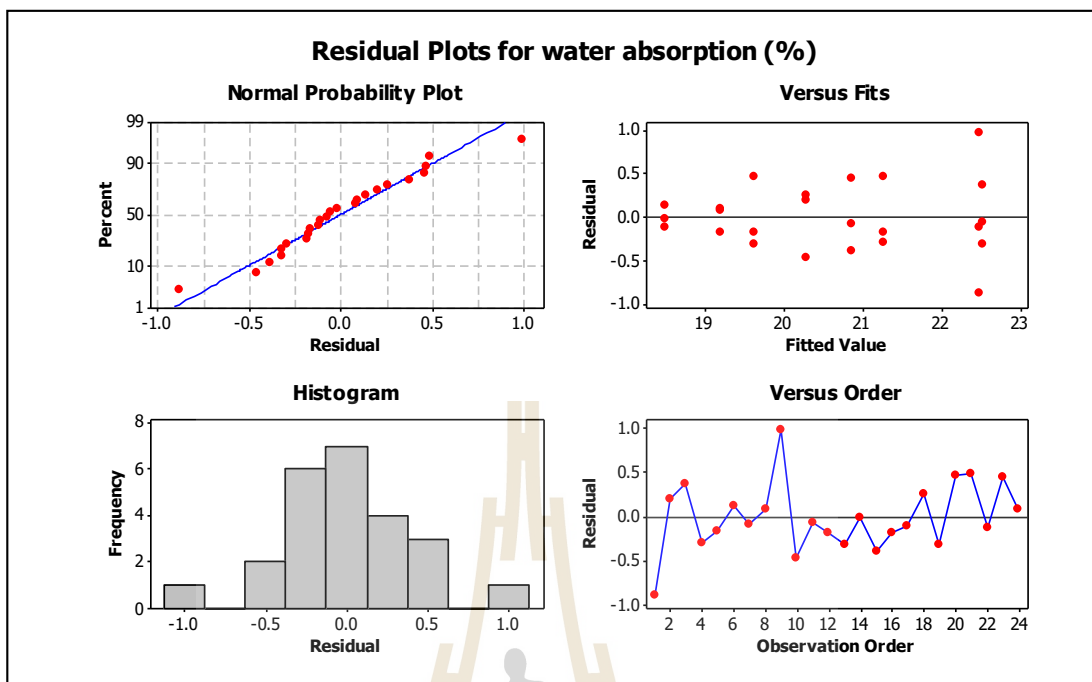
3) การตรวจสอบการความเสถียรภาพของความแปรปรวน ของส่วนตกค้างด้วยการพล็อตกราฟระหว่างความคลาดเคลื่อนกับค่าที่ได้จากการประมาณ ดังแสดงในรูปที่ 4.31 (บนขวา) พบว่าความแปรปรวนของส่วนตกค้างไม่มีแนวโน้มและรูปแบบของการกระจายตัว กล่าวคือส่วนตกค้างมีความเสถียรภาพของความแปรปรวน

4) การตรวจความเป็นอิสระของส่วนตกค้างด้วยการพล็อตกราฟระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.31 (ล่างขวา) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน กล่าวคือส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระ

จากการตรวจสอบสมมติฐานขั้นพื้นฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา พบว่ามีความเหมาะสมกับรูปแบบของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล



รูปที่ 4.30 รูปแบบแผนการออกแบบการทดลอง 2^3 แฟกทอเรียล ของการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา



รูปที่ 4.31 Residual plot ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา

การวิเคราะห์ความแปรปรวนใช้สำหรับวิเคราะห์แผนการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^3 แฟกทอเรียล เพื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลักและปัจจัยรวมที่อาจส่งผลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (95%CI) หรือระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ($\alpha = 0.05$) ผลการทดลองที่ได้จะนำค่า P-value เปรียบเทียบกับค่าระดับนัยสำคัญ หากค่า P-value ของปัจจัยใด ๆ น้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ แสดงว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงในตารางที่ 4.7 และ 4.8

จากตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน พบว่าอิทธิพลหลักทั้งสามปัจจัยส่งผลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอย่างมีนัยสำคัญ สามารถสังเกตจากค่า P-value ได้ ดังนี้ อัตราส่วนเศษเมลามีน (A) มีค่า P-value = 0.000 น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าอัตราส่วนเศษเมลามีนมีอิทธิพลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอย่างมีนัยสำคัญ สารเพิ่มฟอง (B) มีค่า P-value = 0.000 น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าสารเพิ่มฟองมีอิทธิพลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอย่างมีนัยสำคัญ และปัจจัยความหนาแน่น (C) มีค่า P-value = 0.000 น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าความหนาแน่นมีอิทธิพลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะเดียวกันไม่พบอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยแต่ละปัจจัย (ค่า P value ในตารางที่ 4.8) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับรูปที่ 4.32 ที่แสดงให้เห็นว่าจุดของปัจจัยหลัก A, B และ C อยู่บนเส้นสมมติฐานการ

แจกแจงตัวแบบปกติ หมายความว่าปัจจัยดังกล่าวมีอิทธิพลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (R-Sq (adj)) มีค่าเท่ากับ 89.78% กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงอัด 89.78% เกิดจากปัจจัยศึกษาที่สามารถควบคุมได้ และอีก 10.22% เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมไม่ได้ (error)

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา

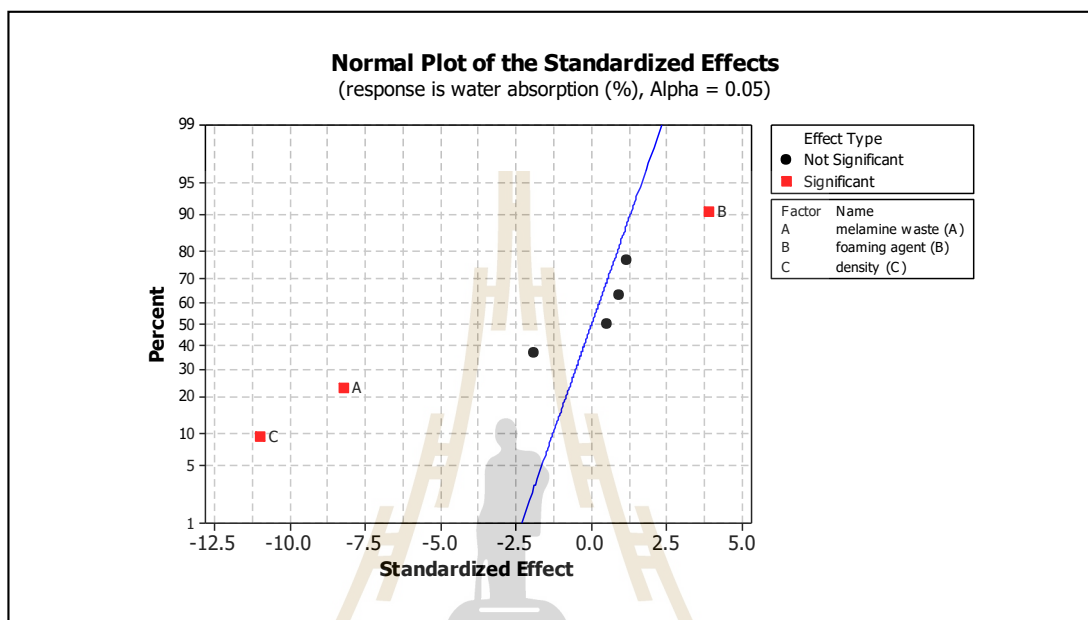
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
ค่าคงที่		20.593	0.0952	216.26	0.000
อัตราส่วนเศษเมลามีน (A)	-1.562	-0.781	0.0952	-8.20	0.000
สารเพิ่มฟอง (B)	0.740	0.370	0.0952	3.88	0.001
ความหนาแน่น (C)	-2.092	-1.046	0.0952	-10.98	0.000
AB	0.095	0.047	0.0952	0.50	0.625
AC	0.171	0.085	0.0952	0.90	0.383
BC	0.220	0.110	0.0952	1.15	0.265
ABC	-0.367	-0.184	0.0952	-1.93	0.072
S=0.466503		R-sq = 92.89%		R-sq (adj) = 89.78%	

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์แปรปรวนของปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา

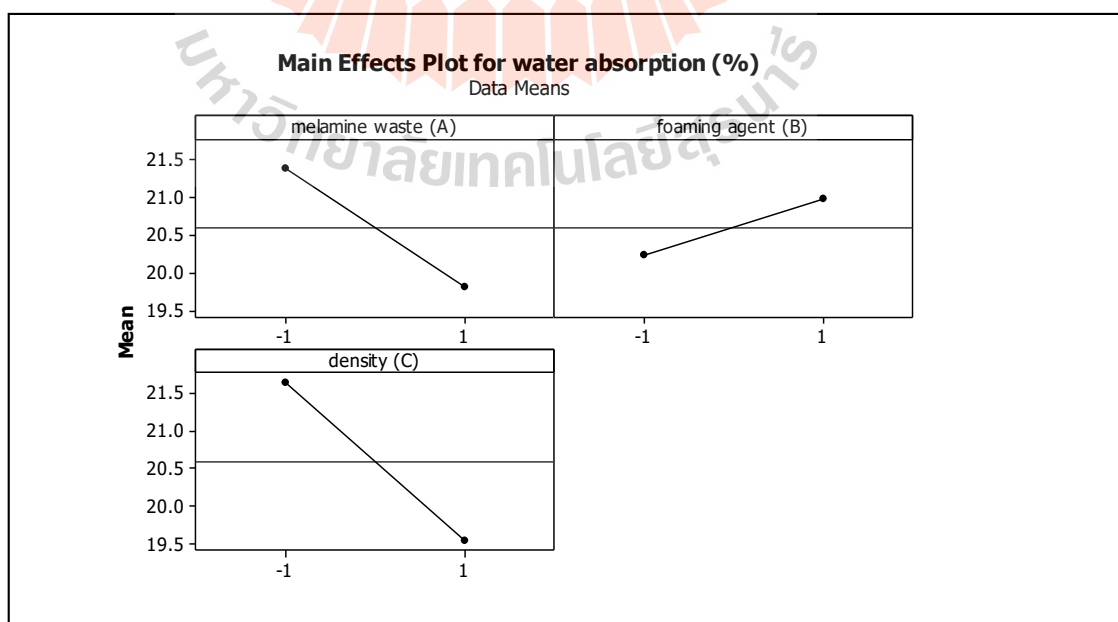
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main effect	3	44.1672	44.1672	14.7224	67.65	0.000
2-way Interactions	3	0.5187	0.5187	0.1729	0.79	0.515
3-way Interaction	1	0.8100	0.8100	0.8100	3.72	0.072
Residual Error	16	3.4820	3.4820	0.2176		
Pure Error	16	3.4820	3.4820	0.2176		
Total	23	48.9780				

จากรูปที่ 4.33 เป็นการวิเคราะห์อิทธิพลหลักประกอบด้วย อัตราส่วนเศษเมลามีน (A) สารเพิ่มฟอง (B) และความหนาแน่น (C) พบว่าทั้งสามปัจจัย มีอิทธิพลต่อการดูดซึมน้ำของ

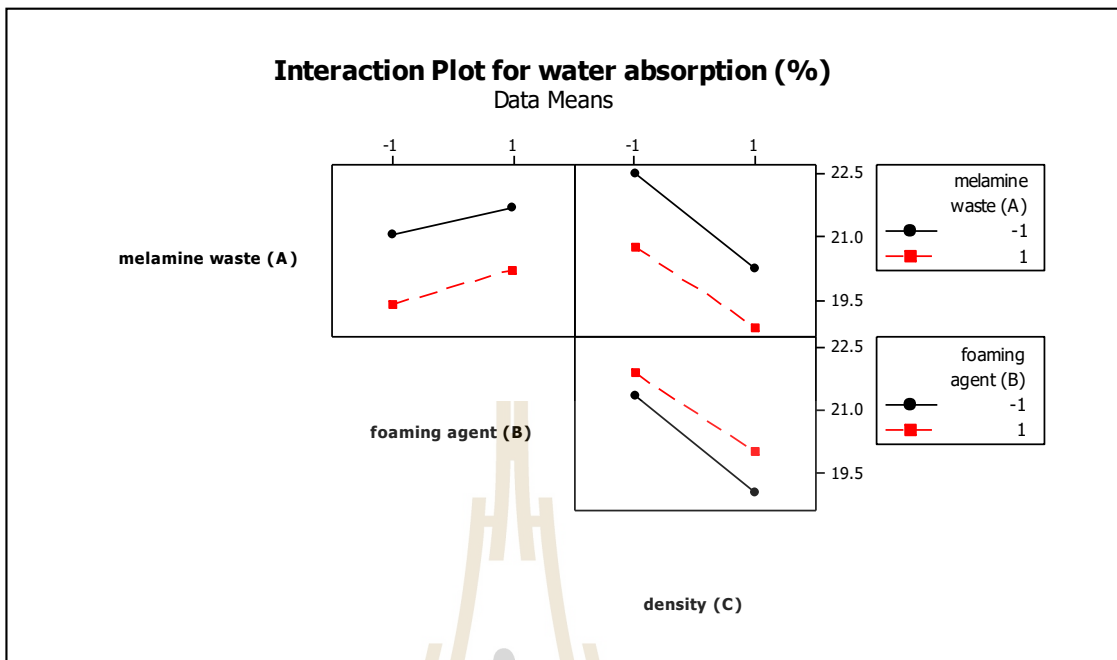
คอนกรีตมวลเบา โดยอัตราส่วนเศษเมลามีน (A) และความหนาแน่น (C) มีความชันเป็นลบ กล่าวคือเมื่อคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีน 90:10 และมีความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ ทำให้การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาลดลง ในทางกลับกันสารเพิ่มฟองมีความชันเป็นบวก เมื่อคอนกรีตมวลเบาใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์จะส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.32 ความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าประมาณของอิทธิพลทั้งหมดของการทดสอบการดูดซึมน้ำ



รูปที่ 4.33 อิทธิพลหลักของปัจจัยต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา



รูปที่ 4.34 อิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัยต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา

จากรูปที่ 4.34 เป็นการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction plot) พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอย่างมีนัยสำคัญ สังเกตได้จากความชันของแต่ละปัจจัยที่ไม่แตกต่างกัน

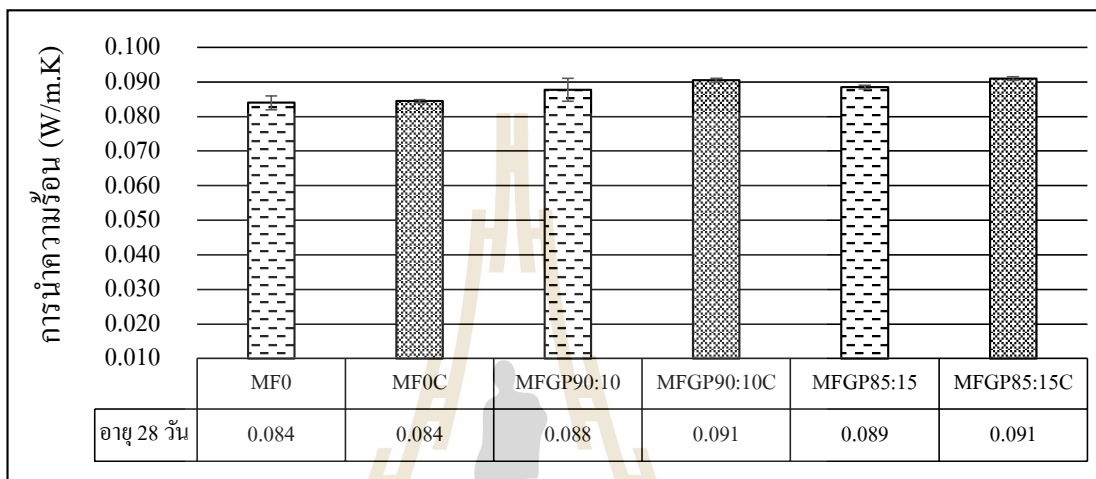
การสร้างแบบจำลองสมการถดถอยจะเลือกเฉพาะปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบแทนมาสร้างสมการ ซึ่งการเลือกปัจจัยจะพิจารณาจากค่า P-value (ตารางที่ 4.7) เทียบกับค่าระดับนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) หาก $P\text{-value} < 0.05$ แสดงว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยหรือค่า Coefficient ในตารางที่ 4.7 มาแทนในสมการที่ 4.1 ซึ่งเป็นแบบจำลองการถดถอยแบบเต็มรูปแบบ (Full regression model) ทั้งนี้ผู้วิจัยจะทำการตัดปัจจัยบางปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อผลตอบแทนออก จะได้แบบจำลองการถดถอยดังสมการที่ 4.3

$$Y_{WA} = 20.59 - 0.78A + 0.37B - 1.05C \tag{4.3}$$

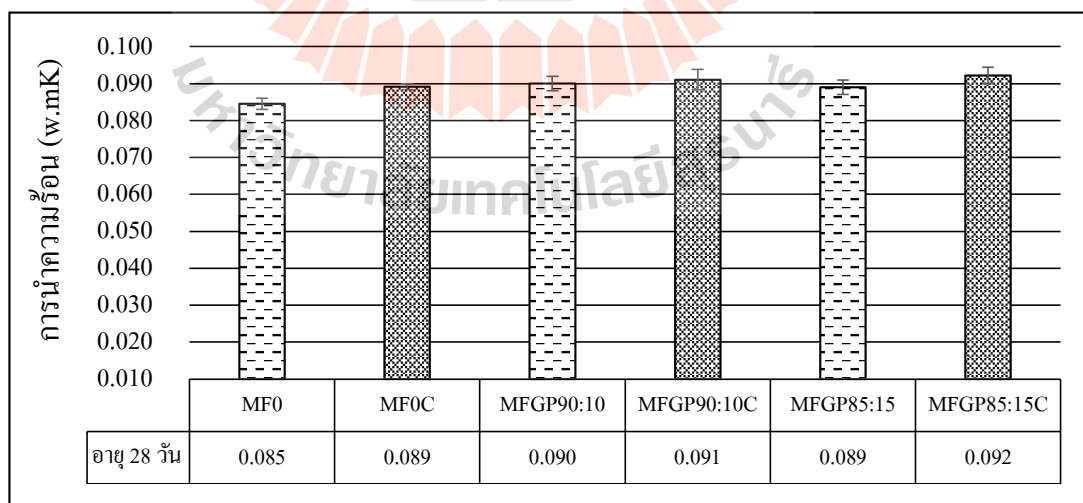
4.4.6 การเปรียบเทียบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

รายละเอียดผลการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่ใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์แสดงในตารางที่ ก.14 ในภาคผนวก ก และการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการนำ

ความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ ที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m³ อายุ 28 วัน แสดงใน รูปที่ 4.35 และ 4.36 ตามลำดับ พบว่าค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้ สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์มีค่าสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองชนิด สังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 เล็กน้อย



รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟอง สองยี่ห้อที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m³ (C คือคอนกรีตมวลเบาผสมสารเพิ่มฟอง เชิงพาณิชย์)



รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟอง สองยี่ห้อที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m³ (C คือคอนกรีตมวลเบาผสมสารเพิ่มฟอง เชิงพาณิชย์)

รูปที่ 4.35 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ ที่ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$ อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฟูน 85:15 มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฟูน 90:10 ทั้งสารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์

รูปที่ 4.36 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ ที่ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$ อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฟูน 85:15 มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฟูน 90:10 ทั้งสารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$

ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์สูงกว่าที่ใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 สามารถอธิบายได้ดังนี้ สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ทำให้คอนกรีตมีการอัดตัวแน่นกว่าสารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 จึงอาจส่งผลให้มีค่าการนำความร้อนสูงกว่าเล็กน้อย

4.4.7 ผลวิเคราะห์การนำความร้อนด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

จากการกำหนดปัจจัยสำหรับการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ ทำการจัดลำดับและการทดลองแบบสุ่มของการทดลองในตารางที่ 4.2 สำหรับแผนการทดลองเชิงแฟกทอเรียลของการทดสอบการนำความร้อน จะกำหนดการจัดลำดับปัจจัย 3 ปัจจัย ระดับของปัจจัยมี 2 ระดับ แต่ละครั้งของการทดลองให้มีจำนวนการทดลอง 2 ซ้ำ ดังนั้นต้องทำการทดลองทั้งหมด 16 ครั้ง ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลของการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนแสดงในตารางที่ 4.9 ซึ่งผู้วิจัยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab Version 16 ช่วยในการคำนวณทางสถิติและวิเคราะห์ผลการทดลอง กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ($\alpha = 0.05$)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนใช้สำหรับวิเคราะห์แผนการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2³ แฟกทอเรียล เพื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่อาจส่งผลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (95%CI) หรือระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ($\alpha = 0.05$) ผลการทดลองที่ได้จะนำค่า P-value เปรียบเทียบกับค่าระดับนัยสำคัญ หากค่า P-value ของปัจจัยใด ๆ น้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ แสดงว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงในตารางที่ 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลของการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีน

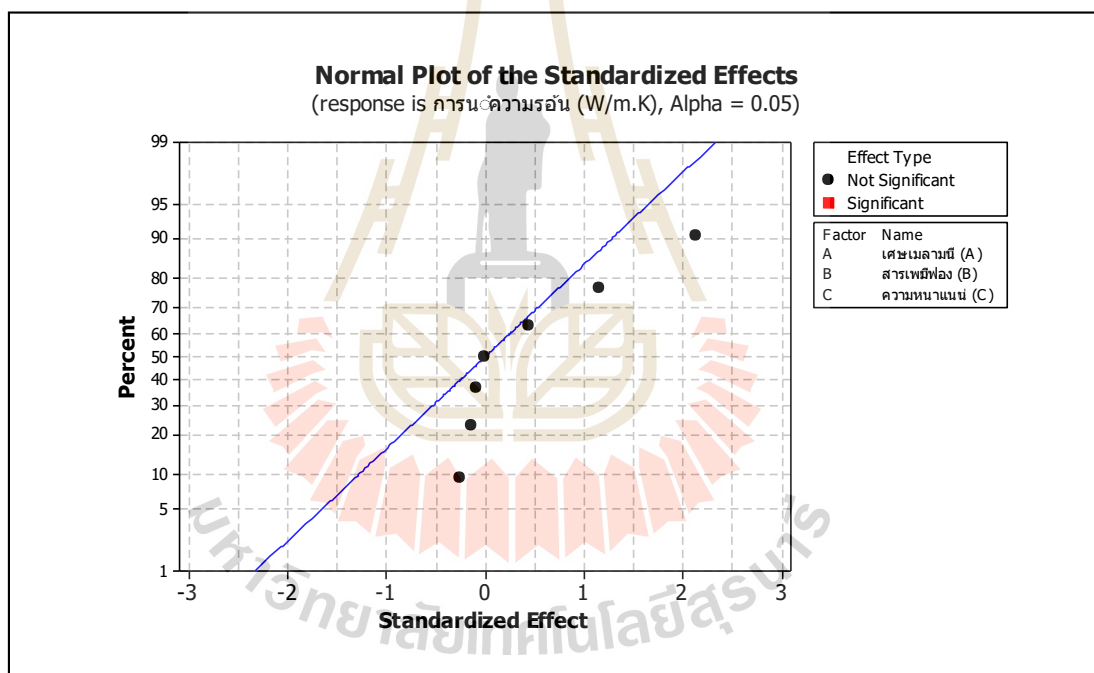
รหัส	ระดับของปัจจัย			ผลการทดสอบการนำความร้อน (W/m.K)		
	อัตราส่วน เศษเมลามีน	สารเพิ่ม ฟอง	ความ หนาแน่น	1	2	ค่าเฉลี่ย
MFGPD11 85:15	-1	-1	-1	0.0889	0.0884	0.0886
MFGPD11C 85:15	-1	1	-1	0.0905	0.0915	0.0910
MFGPD11 90:10	1	-1	-1	0.0845	0.0910	0.0877
MFGPD11C 90:10	1	1	-1	0.0910	0.0900	0.0905
MFGPD13 85:15	-1	-1	1	0.0874	0.0910	0.0892
MFGPD13C 85:15	-1	1	1	0.0944	0.0899	0.0922
MFGPD13 90:10	1	-1	1	0.0915	0.0884	0.0899
MFGPD13C 90:10	1	1	1	0.0910	0.0932	0.0921

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์หาค่าอิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
ค่าคงที่		0.9015	0.0006	149.47	0.000
อัตราส่วนเศษเมลามีน (A)	-0.0001	-0.0000	0.0006	-0.14	0.895
สารเพิ่มฟอง (B)	0.0025	0.0013	0.0006	2.13	0.066
ความหนาแน่น (C)	0.0014	0.0007	0.0006	1.15	0.285
AB	-0.0001	0.0000	0.0006	-0.09	0.932
AC	0.0005	0.0003	0.0006	0.44	0.670
BC	0.0000	0.0000	0.0006	-0.00	0.996
ABC	-0.0003	-0.0002	0.0006	-0.25	0.808
S=0.00241261		R-sq = 43.83%		R-sq (adj) = 0.00%	

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main effect	3	0.000034	0.000034	0.000011	1.95	0.200
2-way Interactions	3	0.000007	0.000007	0.000000	0.07	0.976
3-way Interaction	1	0.000000	0.000000	0.000000	0.06	0.808
Residual Error	8	0.000046	0.000046	0.000006		
Pure Error	8	0.000046	0.000046	0.000006		
Total	15	0.000082				



รูปที่ 4.37 ความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าประมาณของอิทธิพลทั้งหมดของการทดสอบการนำความร้อน

จากตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน พบว่าอิทธิพลหลักทั้งสามปัจจัย ไม่ส่งผลต่อการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอย่างมีนัยสำคัญ สามารถสังเกตจากค่า P-value ได้ดังนี้ อัตราส่วนเศษเมลามีน (A) มีค่า P-value = 0.895 มากกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าสารเพิ่มฟองไม่มีอิทธิพลต่อการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอย่างมีนัยสำคัญ สารเพิ่มฟอง (B) มี

ค่า P-value = 0.066 มากกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าสารเพิ่มฟองไม่มีอิทธิพลต่อการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอย่างมีนัยสำคัญ และปัจจัยความหนาแน่น (C) มีค่า P-value = 0.285 มากกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าความหนาแน่นไม่มีอิทธิพลต่อการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่เดียวกันไม่พบอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยแต่ละปัจจัย (ค่า P value ในตารางที่ 4.10) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับรูปที่ 4.37 ที่แสดงให้เห็นว่าไม่มีปัจจัยใดอยู่นอกเส้นสมมติฐานการแจกแจงตัวแบบปกติ หมายความว่าปัจจัยดังกล่าวไม่มีอิทธิพลต่อการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (R-Sq (adj)) มีค่าเท่ากับ 0.00% กล่าวคือปัจจัยในการทดลองไม่ส่งผลต่อผลการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา หรือผลการนำความร้อนไม่ขึ้นกับปัจจัยใด

4.4.8 สรุปผลการเปรียบเทียบสารเพิ่มฟอง

การเปรียบเทียบสารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่ใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ให้ค่ากำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อนสูงกว่า เนื่องจากขนาดรูพรุนของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์มีขนาดเล็กลง ทำให้การยึดเกาะกันของส่วนผสมสามารถยึดเกาะได้แน่นขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาสูงขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่น 90:10 ที่ใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ (MFGP90:10C) ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด และมีค่าการดูดซึมน้ำเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน มอก. เลขที่ 2601-2556 ยิ่งไปกว่านั้นการใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ยังส่งผลดีในเรื่องการผลิตคอนกรีตในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดและสามารถปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น เมื่อเทียบกับการใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนผสมระหว่างเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ และเพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนจากการใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 และสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 อิทธิพลของอัตราส่วนผสมระหว่างเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นในการแทนที่ทรายในคอนกรีตมวลเบา

การใช้ประโยชน์เศษเมลามีนเป็นมวลรวมละเอียดในคอนกรีตมวลเบา โดยทรายถูกแทนที่ด้วยอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่นด้วยอัตราส่วน 100:0, 50:50, 75:25, 85:15, 90:10 และ 0:100 ในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก พบว่าเศษเมลามีนสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาได้ โดยเฉพาะค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเมลามีนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเศษเมลามีนแบบเม็ดมีลักษณะผิวหยาบ รูปร่างมีเหลี่ยมมุม และสมบัติการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนทำให้บริเวณขอบมีความชื้นและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์ยึดเกาะกับเศษเมลามีนได้ดีขึ้น รวมถึงเศษเมลามีนแบบฝุ่นมีขนาดอนุภาคเล็กและมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าเศษเมลามีนแบบเม็ด จึงสามารถแทรกตัวในช่องว่างระหว่างวัสดุอื่นได้ดี ทำให้คอนกรีตอัดตัวแน่นขึ้น และเศษเมลามีนแบบเม็ดสามารถกระจายตัวได้ดี มีการวางตัวในแนวตั้ง ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกันกับการรับแรงอัด จึงช่วยเสริมแรงให้คอนกรีตรับแรงอัดได้ดีขึ้น การรวมกันของเศษเมลามีนทำให้ขนาดคละของมวลรวมละเอียดดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้กำลังรับแรงอัดดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ ในขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ เนื่องจากเศษเมลามีนมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าทราย ทำให้คอนกรีตมวลเบามีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น และการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนเบามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ เนื่องจากภายในคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีเนื้ออัดแน่นมากขึ้น จึงนำความร้อนได้มากขึ้น

5.1.2 ผลการเปรียบเทียบสารเพิ่มฟอง

การเปรียบเทียบคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 กับที่ใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าที่ใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 ในขณะที่เดียวกันคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ให้ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่ยังอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐาน มอก. เลขที่ 2601-2556 นอกจากนี้คอนกรีตมวลเบาที่มีค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาที่ใช้สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดสามารถอธิบายได้จากขนาดรูพรุนของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์มีขนาดเล็กลง มีการกระจายตัวของรูพรุนได้ดีทั่วทั้งหน้าตัด เมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1 จึงทำให้คอนกรีตมวลเบาอัดตัวได้แน่นขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น แต่ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน

อัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น 90:10 เป็นสูตรผสมที่มีค่ากำลังรับอัดและค่าการดูดซึมน้ำผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน มอก.เลขที่ 2601-2556 และสูตรผสมนี้ยังสามารถรีไซเคิลเศษเมลามีนทั้งสองรูปแบบ โดยเฉพาะเศษเมลามีนแบบเม็ดที่มีปริมาณมากในกระบวนการผลิต สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงสมบัติคอนกรีตมวลเบาให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเช่นกัน ลดการใช้ทรายที่เป็นทรัพยากรธรรมชาติ ใช้ประโยชน์ของเสียโดยการนำกลับมาใช้ใหม่และสามารถพัฒนาต่อยอดให้ผลิตคอนกรีตมวลเบาในเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคตได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) การปรับขนาดของเศษเมลามีนแบบเม็ดให้มีขนาดเล็กลง ทำให้ขนาดคละอยู่ในช่วงมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 สามารถช่วยปรับปรุงกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตให้ดีขึ้น และการปรับขนาดของเศษเมลามีนแบบฝุ่นให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยตะแกรงร่อนตามมาตรฐาน ASTM C33 ช่วยในการคัดเลือกรูขนาดให้มีขนาดคละอยู่ในช่วงที่กำหนด อาจส่งผลให้การดูดซึมน้ำของคอนกรีตลดลง

2) คอนกรีตมวลเบาผสมอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตามควรศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องการลดอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา เพื่อให้สมบัติการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง

3) คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนสามารถใช้เป็นแนวทางในการรีไซเคิลเศษเมลามีน โดยใช้เป็นมวลรวมในการแทนที่ทรายบางส่วน และจากงานวิจัยนี้ผู้วิจัยแนะนำสูตรผสม MFGP90:10 สำหรับงานก่อผนังทั่วไปแบบไม่รับแรง (ฉาบปิดผิว) เนื่องจากให้ค่ากำลังรับแรงอัด และค่าการดูดซึมน้ำเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติม ฟองอากาศมาตรฐานเลขที่ มอก.2601-2556 สามารถนำสูตรผสมไปพัฒนาเพื่อผลิตในเชิงพาณิชย์ ได้ สำหรับการผสมในเชิงพาณิชย์ควรคำนึงถึงปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสม เนื่องจากเศษเมลามีนมีความสามารถในการดูดซึมน้ำและมีรูปร่างแบนเหลี่ยม ทำให้ความหนาแน่นแปรปรวน ส่งผลต่อความแข็งแรงและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา



รายการอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2558). สถานการณ์การกำจัดขยะมูลฝอยและของเสียอันตราย. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2558 รอบ 6 เดือน. หน้า 28-38
- กฤติยา วงศ์เลน. (2555). อิทธิพลของการดูดซึมน้ำและอุณหภูมิขึ้นรูปต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ัชชวาลย์ เศรษฐบุตร. (2543). คอนกรีตเทคโนโลยี (พิมพ์ครั้งที่ 8). กรุงเทพมหานคร: บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด.
- ชาญณรงค์ สายแก้ว (2557). สถิติและการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. พิมพ์ครั้งที่ 3. 748 หน้า.
- บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด. (2557). คู่มือข้อมูลสินค้าปูนซีเมนต์งานโครงสร้าง เอสซีจี. แหล่งที่มา: [https://www.scgbuildingmaterials.com/th/products/SCG-HYBRID-CEMENT-\(in-paper-bag-50-kg-\)/8852437102244](https://www.scgbuildingmaterials.com/th/products/SCG-HYBRID-CEMENT-(in-paper-bag-50-kg-)/8852437102244) ค้นเมื่อ 31 พฤษภาคม 2559
- ปริญญา จินดาประเสริฐ (2553). เถ้าลอยในงานคอนกรีต. ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน. พิมพ์ครั้งที่ 4. 110 หน้า.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2556). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 7.
- ปรีชา พหลเทพ (2535). โพลีเมอร์ high polymers. มหาวิทยาลัยรามคำแหง พิมพ์ครั้งที่ 6, 423 หน้า
- ยุพา ชาญวิกรัย และ ดร. นพ. ประสงค์ เทียนบุญ (2553). เมลามีน. วารสารคลินิกอาหารและโภชนาการ (วคอก) พ.ศ. 2553 ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 หน้า 63-66.
- วิชา ภูจินดา. (2548). การใช้ประโยชน์สารลดแรงตึงผิวในการบำบัดน้ำเสีย. วารสารการจัดการสิ่งแวดล้อม ปีที่ 1 ฉบับที่ 1.
- คันสนีย์รัก ไทยเจริญชีพ, (2558). ประโยชน์จากเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ในงานทดสอบวัสดุดิบและผลิตภัณฑ์. กรมวิทยาศาสตร์บริการ ปีที่ 63 ฉบับที่ 197, หน้า 38-40
- สุทธิรักษ์ สุจริตตานนท์. (2534). ขยะมูลฝอย. สารานุกรมสำหรับเยาวชนไทย เล่มที่ ๑๕
- สุธน เสถียรยานนท์ (2551). เมลามีน. ก้าวทันโลกวิทยาศาสตร์. ปีที่ 8(2), หน้า 57-64

- สุพะไชย์ จินดาวุฒิกุล. (2555). การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุอุดซับ. วารสาร
กรมวิทยาศาสตร์บริการ ปีที่ 60 ฉบับที่ 189
- อภัย ชาภิรมย์. (2557). การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของผนังหล่อในที่คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Albano, C., Camacho, N., Hernandez, M., Matheus, A., and Gutierrez, A. (2009). **Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios.** Waste Management, vol.29, pp.2707-2716.
- Ali A. Sayadi, Juan V. Tapia, Thomas R. Neitzert and G. Charles Clifton (2016). **Effect of expanded polystyrene (EPS) particle on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete.** Construction and Building Material, vol.112, pp.716-724.
- Amir M. Azhdarpour, Mohammed R. Nikoudel, Milad Taheri., (2016). **The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation.** Construction and Building Material, vol.109, pp. 55 - 62.
- Ashwini Manjunath B T., (2016) **Partial replacement of E-plastic Waste as Coarse-aggregate in Concrete.** Procedia Environment Sciences, vol.35, pp.731-739.
- ASTM C33/C33M-13 (2013). **Standard Specification for Concrete Aggregates.** Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM C109/C109M-13 (2013). **Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube specimens).** Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM C128-12 (2012). **Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of fine Aggregates.** Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM C150/C150M-15 (2015). **Standard specification for portland cement.** Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM C495/C495M-12 (2012). **Standard Test Method for Compressive Strength of Lightweight Insulating Concrete.** Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.

- ASTM C567/C567M-14 (2014). **Standard Test Method for Determining Density of Structural Lightweight Concrete.** Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM C642/C642M-97 (2016). **Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.** Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM C796/C796M (2012). **Standard specification for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam.** Annual Book of ASTM Standards. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM E1225-13 (2013). **Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids Using the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique.** Annual Book of ASTM Standards. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- BS 882 (1992). **Specification for Aggregate from Natural Sources for concrete.** British Standard Institute, London.
- Chalermchai Chaitongrat and Somsak Siwadamrongpong. (2018). **Recycling of melamine formaldehyde waste as fine aggregate in lightweight concrete.** Songklanakarin Journal of Science and Technology, vol. 40, No. 1 (January-February, 2018). *IN PRESS*
- Chalermchai Chaitongrat and Somsak Siwadamrongpong. (2015). **Recycling of Melamine Formaldehyde Waste in Lightweight Concrete as Aggregate Replacement.** In The 9th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC). Suranaree University of Technology, 27-30 July 2015. Surasammanakarn.
- Deividas Rumšys, Darius Bacinskas, Edmundas Spudulis and Adas Meskenas (2017). **Comparison of material properties of lightweight concrete with recycled polyethylene and expanded clay aggregates.** Procedia engineering, vol.172, pp.937-944
- Goodman, S.W. (1998). **Handbook of Thermoset Plastics.** (2nd Edition), Raytheon Systems Company EI, Segundo, California.
- Hasan S. Dweik, Mohamed M. Ziara and Mohamed S. Hadidoun, (2008). **Enhancing Concrete Strength and Thermal Insulation Using Thermoset Plastic Waste.** International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials, vol. 57, pp.635-656
- Khamphree J., Theerawat S., Prinya C., (2011). **Cellular Lightweight Concrete Containing Pozzolan Materials.** Procedia Engineering 14, pp.1157–1164.

- Kinda Hannawi, Siham Kamali-Bernard and William Prince, (2010). **Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregate**. Waste Management, vol.30, pp.2312-2320.
- M. Muzafar Ahmed and Dr. S. Siddi Raju, (2015). **Properties of Concrete by the Addition of Plastic Solid Waste**. International Journal of Science and Research (IJSR), vol.4, Issue 5, pp.1170-1173.
- M. Guendouz, F. Debieb, O. Boukendakdji, EH. Kadri, M. Bentchikou and H. Soualhi, (2016). **Use of plastic waste in sand concrete**. J. Mater. Environ. Sci. (JMES), ISSN: 2028-2508, vol.7, pp.382-389.
- Mariaenrica Frigione, (2010). **Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete**. Waste management, vol.30, pp.1101-1106.
- Md. Mostafizur Rahman¹, Md. Akhtarul Islam¹, Mainuddin Ahmed and Md. Abdus Salam, (2012). **Recycled Polymer Materials as Aggregates for Concrete and Blocks**. Journal of Chemical Engineering (IEB), Vol. 27, No. 1.
- Mehmet Gesoglu, Erhan Guneyisi, Osman Hansu, Serkan Etli and Mahammed Alhassan, (2017). **Mechanical and fracture characteristics of self-compacting concretes containing different percentage of plastic waste powder**. Construction and Building Materials, vol.40, pp.562-569.
- Montgomery, DC., (2009). **Design and Analysis of Experiments**, 7th ed. (2009) John Wiley & Sons, New York.
- Nabajyoti Saikia^{a,b} and Jorge de Britoa, (2013). **Waste Polyethylene Terephthalate as an Aggregate in Concrete**. Materials Research, vol.16, pp.341-350.
- Nattakan Dulsang, Pornnapa Kasemsiri, Salim Hiziroglu and Prinya Chindapasirt, (2016). **Characterization of an environment friendly lightweight concrete containing ethyl acetate waste**. Materials and Design, vol.96, pp.350-356.
- Narayanan, N., and Ramamurthy, K. (2000). **Structure and properties of aerated concrete: a review**. Cement and Concrete Composites, Vol. 22, pp. 321–329.
- Ning Liu and Bing Chen, (2014). **Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete**. Construction and Building Materials, vol.68, pp.227-232.

- Nikoo Haghghatnejad, S. Yasin Mousavi, S. Jalal Khaleghi, Alireza Tabarsa and Saman Yousefi, (2016). **Properties of recycle PVC aggregate concrete under difference conditions.** Construction and Building Materials, vol.126, pp.943-950.
- Nitish Puri, Brijesh Kumar and Himanshu Tyagi. (2013). **Utilization of Recycled Waste as Ingredients in Concrete Mix.** International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), vol.2, Issue2, pp.74-78.
- Nursyamsi and Winner Syukur Berhat Zebua, (2017). **The influence of pet plastic waste gradation as coarse aggregate towards compressive strength of light concrete.** Procedia Engineering, vol.171, pp.614-619.
- Phaiboo Panyakapo and Mallika Panyakapo, M. (2008). **Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete.** Waste Management, vol.28, pp.1581-1588.
- Powers, T.C., and Helmuth, R.A. (1953). **Theory of Volume Changes in Hardened Portland-Cement Paste During Freezing.** Proceedings of the 32nd Annual Meeting of the Highway Research Board, vol.32: 13-16 January; Washington, D.C.; pp.285-297.
- S.C. Kou, G. Lee, C.S Poon., and W.L. Lai. (2009). **Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes.** Waste Management, vol.29, pp.232-240.
- Semiha Akçaözöglü, Cengiz Duran Atış and Kubilay Akçaözöglü, 2010. **An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete.** Waste management, vol. 30, pp.285-290.
- Sina Safinia and Amani Alkalbani. (2016). **Use of recycled plastic water bottles in concrete blocks.** Procedia Engineering, vol.164, pp.214-221.
- Somsak Siwadamrongpong, and Janjira Aphirakmethawong. (2015). **Effect of Particle Size and Content of Waste Melamine Formaldehyde on Mechanical Properties of High Density Polyethylene Composites.** In The 9th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC). Suranaree University of Technology, 27-30 July 2015. Surasammanakarn



ตารางที่ ก.1 การดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนแบบฝุ่น

วันที่ทดสอบ 20/3/2560

Flask No.	สัญลักษณ์	1	2
ปริมาตรของ Flask	V	500	500
น.น.เศษเมลามีน (g)	B	500.00	500.00
น.น.Flask + เศษเมลามีน (sat.surf.day) + น.น.น้ำ	C	994.70	1023.86
น.น.ถาดที่ใช้อบแห้ง (g)		159.35	159.35
น.น.ถาดที่ใช้อบแห้ง + น.น.เศษเมลามีน อบแห้ง (g)		345.42	362.05
น.น.เศษเมลามีนอบแห้ง	A	186.07	202.7
น.น.Flask + น.น.น้ำ (g)	D	959.76	959.76
Bulk specific gravity	$A/(B+D-C)$	0.400	0.465
Bulk specific gravity (ssd)	$B/(B+D-C)$	1.075	1.147
Apparent specific gravity	$A/(D+A-C)$	1.231	1.462
Percent Absorption	$(B-A)/A*100$	168.716	146.670

วัสดุ : ทราย

วันที่ทดสอบ 26/12/2559

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างที่ 1 ทราย

น.น.ตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ = 500.06 g

ตะแกรง หมายเลข	ขนาด ตะแกรง (mm)	น.น. ตะแกรง (g)	น.น. ที่ค้าง + ตะแกรง (g)	น.น. ที่ค้าง บนตะแกรง (g)	% ที่ค้าง บนตะ แกรง	% ที่ค้าง สะสมบน ตะแกรง	% ที่ผ่าน ตะแกรง
4	4.75	507.10	507.10	0.00	0.00	0.00	100.00
8	2.36	484.10	484.10	0.00	0.00	0.00	100.00
16	1.18	412.30	412.30	0.00	0.00	0.00	100.00
30	0.60	386.70	432.30	45.60	9.11	9.11	90.89
50	0.30	546.70	681.20	134.50	26.87	35.99	64.01
100	0.15	340.90	581.30	240.40	48.03	84.02	15.98
ถาด		488.40	498.50	72.90	14.57	98.59	1.41
รวม				493.40	98.59	227.71	

Fineness Modulus = 2.28

วัสดุ : เศษเมลามีนแบบเม็ด

วันที่ทดสอบ 26/12/2559

ตารางที่ ก.3 ตัวอย่างที่ 2

เศษเมลามีนแบบเม็ด น.น.ตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ = 500.04 g

ตะแกรง หมายเลข	ขนาด ตะแกรง (mm)	น.น. ตะแกรง (g)	น.น. ที่ค้ำ+ ตะแกรง (g)	น.น. ที่ค้ำ บนตะแกรง (g)	% ที่ค้ำ บนตะ แกรง	% ที่ค้ำ สะสมบน ตะแกรง	% ที่ผ่าน ตะแกรง
4	4.75	505.90	505.90	0.00	0.00	0.00	100.00
8	2.36	484.20	495.50	11.30	2.26	2.26	97.74
16	1.18	412.10	791.40	379.30	75.79	78.05	21.95
30	0.6	386.20	444.40	58.20	11.63	89.68	10.32
50	0.3	547.90	561.40	13.50	2.70	92.37	7.63
100	0.15	341.90	350.10	8.20	1.64	94.01	5.99
ถัด		488.00	488.30	15.50	3.10	97.00	3.00
รวม				486.00	97.11	453.47	

Fineness Modulus = 4.53

วัสดุ : เศษเมลามีนแบบฝุ่น

วันที่ทดสอบ 26/12/2559

ตารางที่ ก.4 ตัวอย่างที่ 3 เศษเมลามีนแบบฝุ่น

น.น.ตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ = 500.25 g

ตะแกรง หมายเลข	ขนาดตะ แกรง (mm)	น.น. ตะแกรง (g)	น.น. ที่ค้ำ + ตะแกรง (g)	น.น. ที่ค้ำ บนตะแกรง (g)	% ที่ค้ำ บนตะ แกรง	% ที่ค้ำ สะสมบน ตะแกรง	% ที่ผ่าน ตะแกรง
4	4.75	505.70	505.70	0.00	0.00	0.00	100.00
8	2.36	484.70	482.70	0.00	0.00	0.00	100.00
16	1.18	411.40	411.40	0.00	0.00	0.00	100.00
30	0.60	386.20	386.20	0.00	0.00	0.00	100.00
50	0.30	546.40	547.90	1.50	0.30	0.30	99.70
100	0.15	341.60	344.70	3.10	0.62	0.92	99.08
ถัด		488.70	718.80	478.70	95.65	96.57	3.00
รวม				483.30	96.57	97.79	

Fineness Modulus = 0.98

วัสดุ : ทราช+เศษเมลามีนแบบฝุ่น

วันที่ทดสอบ 26/12/2559

ตารางที่ ก.5 ตัวอย่างที่ 4 ทราช+เศษเมลามีนแบบฝุ่น น.น.ตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ = 500.25 g

ตะแกรง หมายเลข	ขนาดตะ แกรง (mm)	น.น. ตะแกรง (g)	น.น. ที่ค้ำ + ตะแกรง (g)	น.น. ที่ค้ำ บนตะแกรง (g)	% ที่ค้ำ บนตะ แกรง	% ที่ค้ำ สะสมบน ตะแกรง	% ที่ผ่าน ตะแกรง
4	4.75	506.75	506.75	0.00	0.00	0.00	100.00
8	2.36	483.75	483.75	0.00	0.00	0.00	100.00
16	1.18	412.08	412.08	0.00	0.00	0.00	100.00
30	0.60	386.58	420.78	34.20	6.83	6.83	93.17
50	0.30	546.63	647.88	101.25	20.23	27.06	72.94
100	0.15	341.08	522.15	181.08	36.18	63.25	36.75
ถัด		488.48	553.58	174.35	34.84	98.08	1.92
รวม				490.88	98.08	195.23	

Fineness Modulus = 1.95

วัสดุ : ทราช+เศษเมลามีน

วันที่ทดสอบ 26/12/2559

ตารางที่ ก.6 ตัวอย่างที่ 5 ทราช+เศษเมลามีน 50:50 น.น.ตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ = 500.25 g

ตะแกรง หมายเลข	ขนาดตะ แกรง (mm)	น.น. ตะแกรง (g)	น.น. ที่ค้ำ + ตะแกรง (g)	น.น. ที่ค้ำ บนตะแกรง (g)	% ที่ค้ำ บนตะ แกรง	% ที่ค้ำ สะสมบน ตะแกรง	% ที่ผ่าน ตะแกรง
4	4.75	506.58	506.58	0.00	0.00	0.00	100.00
8	2.36	483.93	482.70	2.97	0.59	0.59	99.41
16	1.18	411.15	458.05	46.90	9.37	9.97	90.03
30	0.60	386.50	428.08	41.58	8.31	18.27	81.73
50	0.30	546.45	649.35	102.90	20.56	38.83	61.17
100	0.15	341.08	522.98	181.90	36.35	75.18	24.82
ถัด		488.48	538.90	118.93	23.76	98.92	1.06
รวม				494.83	98.87	241.79	

Fineness Modulus = 2.42 (*เศษเมลามีน 50:50 คืออัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น
ที่เม็ดร้อยละ 50 ต่อฝุ่นร้อยละ 50 ในการแทนที่ทราชร้อยละ 25)

วัสดุ : ทราช+เศษเมลามีน

วันที่ทดสอบ 26/12/2559

ตารางที่ ก.7 ตัวอย่างที่ 6 ทราช+เศษเมลามีน 75:25 น.น.ตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ = 500.08 g

ตะแกรง หมายเลข	ขนาดตะ แกรง (mm)	น.น. ตะแกรง (g)	น.น. ที่ค้ำ + ตะแกรง (g)	น.น. ที่ค้ำ บนตะแกรง (g)	% ที่ค้ำ บนตะ แกรง	% ที่ค้ำ สะสมบน ตะแกรง	% ที่ผ่าน ตะแกรง
4	4.75	506.65	506.65	0.00	0.00	0.00	100.00
8	2.36	484.00	487.80	2.97	0.76	0.76	99.24
16	1.18	412.10	482.08	46.90	13.98	14.74	85.26
30	0.60	386.43	431.00	41.58	8.91	23.65	76.35
50	0.30	546.60	650.43	102.90	20.75	44.39	55.61
100	0.15	340.95	523.48	181.90	36.47	80.86	19.14
ถัด		488.43	510.53	89.13	17.81	98.67	1.33
รวม				494.83	98.67	263.08	

Fineness Modulus = 2.63 (*เศษเมลามีน 75:25 คืออัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น
ที่เม็ดร้อยละ 75 ต่อฝุ่นร้อยละ 25 ในการแทนที่ทราชร้อยละ 25)

วัสดุ : ทราช+เศษเมลามีน

วันที่ทดสอบ 26/12/2559

ตารางที่ ก.8 ตัวอย่างที่ 7 ทราช+เศษเมลามีน 85:15 น.น.ตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ = 500.38 g

ตะแกรง หมายเลข	ขนาดตะ แกรง (mm)	น.น. ตะแกรง (g)	น.น. ที่ค้ำ + ตะแกรง (g)	น.น. ที่ค้ำ บนตะแกรง (g)	% ที่ค้ำ บนตะ แกรง	% ที่ค้ำ สะสมบน ตะแกรง	% ที่ผ่าน ตะแกรง
4	4.75	506.98	506.98	0.00	0.00	0.00	100.00
8	2.36	484.05	488.18	4.13	0.82	0.82	99.18
16	1.18	412.15	501.68	89.53	17.89	18.71	81.29
30	0.60	386.55	433.50	46.95	9.38	28.09	71.91
50	0.30	546.65	650.40	103.75	20.73	48.82	51.18
100	0.15	341.13	523.60	182.48	36.46	85.28	14.72
ถัด		488.50	503.78	66.23	13.23	98.52	1.48
รวม				493.05	98.52	280.26	

Fineness Modulus = 2.80 (*เศษเมลามีน 85:15 คืออัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น
ที่เม็ดร้อยละ 85 ต่อฝุ่นร้อยละ 15 ในการแทนที่ทราชร้อยละ 25)

วัสดุ : ทราย+เศษเมลามีน

วันที่ทดสอบ 26/12/2559

ตารางที่ ก.9 ตัวอย่างที่ 8 ทราย+เศษเมลามีน 90:10 น.น.ตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ = 500.35 g

ตะแกรง หมายเลข	ขนาดตะ แกรง (mm)	น.น. ตะแกรง (g)	น.น. ที่ค้ำ + ตะแกรง (g)	น.น. ที่ค้ำ บนตะแกรง (g)	% ที่ค้ำ บนตะ แกรง	% ที่ค้ำ สะสมบน ตะแกรง	% ที่ผ่าน ตะแกรง
4	4.75	506.90	506.90	0.00	0.00	0.00	100.00
8	2.36	483.83	485.93	2.10	0.42	0.42	99.58
16	1.18	412.15	512.83	100.68	20.12	20.54	79.46
30	0.60	386.58	426.00	39.43	7.88	28.41	71.59
50	0.30	546.93	648.55	101.63	20.31	48.72	51.28
100	0.15	341.05	522.03	180.98	36.16	84.88	15.12
ถาด		488.33	505.75	67.73	13.53	98.41	1.59
รวม				492.53	98.41	281.38	

Fineness Modulus = 2.81 (*เศษเมลามีน 90:10 คืออัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น
ที่เม็ดร้อยละ 90 ต่อฝุ่นร้อยละ 10 ในการแทนที่ทรายร้อยละ 25)

วัสดุ : ทราย+เศษเมลามีนแบบเม็ด

วันที่ทดสอบ 26/12/2559

ตารางที่ ก.10 ตัวอย่างที่ 9 ทราย+เศษเมลามีนแบบเม็ด น.น.ตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ = 500.04 g

ตะแกรง หมายเลข	ขนาดตะ แกรง (mm)	น.น. ตะแกรง (g)	น.น. ที่ค้ำ + ตะแกรง (g)	น.น. ที่ค้ำ บนตะแกรง (g)	% ที่ค้ำ บนตะ แกรง	% ที่ค้ำ สะสมบน ตะแกรง	% ที่ผ่าน ตะแกรง
4	4.75	506.80	506.80	0.00	0.00	0.00	100.00
8	2.36	484.13	486.95	2.82	0.56	0.56	99.44
16	1.18	412.25	507.08	94.83	18.95	19.51	80.49
30	0.60	386.58	435.33	48.75	9.74	29.25	70.75
50	0.30	547.00	651.25	104.25	20.83	50.08	49.92
100	0.15	341.15	523.50	182.35	36.44	86.52	13.48
ถาด		488.30	495.95	58.55	11.70	98.22	1.78
รวม				491.55	98.22	284.15	

Fineness Modulus = 2.84

ตารางที่ ก.11 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

รหัส	ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ย (kg/m^3)	
	อายุ 28 วัน	อายุ 60 วัน
สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1		
MF0D11	1,086.76	1,103.50
MFGD11	1,057.49	1,059.01
MFGPD1190:10	1,104.79	1,067.69
MFGPD1185:15	1,075.50	1,087.18
MFGPD1175:25	1,094.75	1,070.42
MFGPD1150:50	1,114.31	1,093.31
MFPD11	1,107.05	1,063.32
MF0D13	1,280.67	1,313.85
MFGD13	1,299.31	1,264.40
MFGPD1390:10	1,257.76	1,268.23
MFGPD1385:15	1,292.64	1,259.88
MFGPD1375:25	1,298.27	1,286.64
MFGPD1350:50	1,289.94	1,261.92
MFPD13	1,277.30	1,271.64
สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์		
MF0D11C	1,056.44	1,060.31
MFGPD1190:10C	1,125.63	1,050.73
MFGPD1185:15	1,074.25	1,054.17
MF0D13C	1,337.57	1,280.22
MFGPD1390:10C	1,293.17	1,260.50
MFGPD1385:15C	1,315.18	1,264.40

ตารางที่ ก.12 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

รหัส	ความหนาแน่นเฉลี่ย (kg/m ³)	ค่ากำลังรับแรงอัด (MPa)			
		อายุบ่มเฉลี่ย			
		7 (วัน)	14 (วัน)	28 (วัน)	60 (วัน)
สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1					
MF0D11	1084.97	2.24	2.50	2.60	2.77
MFGD11	1062.81	2.46	2.70	2.87	2.90
MFGPD1190:10	1075.82	2.60	2.82	3.06	3.07
MFGPD1185:15	1088.96	2.65	2.96	3.13	3.31
MFGPD1175:25	1082.01	2.70	3.14	3.36	3.44
MFGPD1150:50	1099.41	2.76	3.26	3.41	3.49
MFPD11	1098.16	3.17	3.63	3.77	3.81
MF0D13	1295.23	3.62	4.67	4.99	5.21
MFGD13	1294.83	4.67	5.21	5.51	5.69
MFGPD1390:10	1275.83	4.79	5.32	5.74	5.93
MFGPD1385:15	1283.86	4.94	5.36	5.85	6.06
MFGPD1375:25	1307.60	5.01	5.48	5.96	6.23
MFGPD1350:50	1275.54	5.14	5.69	6.09	6.40
MFPD13	1291.65	5.96	6.17	6.45	6.70
สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์					
MF0D11C	1067.36	2.22	2.53	3.33	3.60
MFGPD1190:10C	1102.00	2.72	3.18	3.93	4.49
MFGPD1185:15	1075.02	2.96	3.39	3.90	4.62
MF0D13C	1293.91	3.87	5.05	6.34	7.19
MFGPD1390:10C	1304.26	5.17	5.99	7.26	9.02
MFGPD1385:15C	1294.53	5.62	5.85	7.72	9.11

ตารางที่ ก.13 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

รหัส	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย
สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1				
MF0D11	19.00	18.43	19.53	18.99
MFGD11	21.17	21.16	20.91	21.08
MFGPD1190:10	20.49	19.82	20.54	20.28
MFGPD1185:15	21.60	23.47	22.37	22.48
MFGPD1175:25	22.59	22.21	21.69	22.16
MFGPD1150:50	23.10	23.84	22.47	23.14
MFPD11	28.46	28.68	28.67	28.60
MF0D13	16.42	16.60	16.36	16.46
MFGD13	18.15	18.02	17.83	18.00
MFGPD1390:10	18.65	18.49	18.39	18.51
MFGPD1385:15	19.46	19.31	20.11	19.63
MFGPD1375:25	19.96	19.95	21.02	20.31
MFGPD1350:50	23.24	20.07	21.52	21.61
MFPD13	22.55	22.96	22.77	22.76
สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์				
MF0D11C	19.50	19.46	19.53	19.49
MFGPD1190:10C	20.97	21.09	21.74	21.26
MFGPD1185:15	22.91	22.48	22.22	22.53
MF0D13C	16.30	16.67	16.79	16.59
MFGPD1390:10C	19.29	19.01	19.28	19.19
MFGPD1385:15C	20.78	20.48	21.32	20.86

ตารางที่ ก.14 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

รหัส	การนำความร้อน (W/m.K)		ค่าเฉลี่ย
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	
สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตร 1			
MF0D11	0.086	0.082	0.084
MFGD11	0.085	0.084	0.085
MFGPD1190:10	0.084	0.091	0.088
MFGPD1185:15	0.089	0.088	0.089
MFGPD1175:25	0.092	0.086	0.089
MFGPD1150:50	0.086	0.086	0.086
MFPD11	0.090	0.087	0.089
MF0D13	0.083	0.086	0.085
MFGD13	0.087	0.086	0.087
MFGPD1390:10	0.088	0.092	0.090
MFGPD1385:15	0.087	0.091	0.089
MFGPD1375:25	0.090	0.090	0.090
MFGPD1350:50	0.088	0.085	0.087
MFPD13	0.092	0.090	0.091
สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์			
MF0D11C	0.084	0.085	0.084
MFGPD1190:10C	0.091	0.090	0.091
MFGPD1185:15	0.090	0.092	0.091
MF0D13C	0.090	0.088	0.089
MFGPD1390:10C	0.094	0.088	0.091
MFGPD1385:15C	0.094	0.090	0.092



ภาคผนวก ข

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Sasiprapa Srichaiyo, Chalermchai Chaitongrat, Kanchala Sudtachat and Somsak Siwadamrongpong. (2017). **Compressive strength and water absorption of cellular lightweight concrete containing melamine formaldehyde waste**. The 11th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium. 13-14 March 2017, Ho Chi Minh City, Vietnam.

ศศิประภา ศรีไชโย, เฉลิมชัย ไชยธงรัตน์ และสมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ (Accepted). **การใช้ประโยชน์เศษเมลามีนเป็นมวลรวมละเอียดในคอนกรีตมวลเบา**. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนักลัญบุรี, ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม 2560.



COMPRESSIVE STRENGTH AND WATER ABSORPTION OF CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE CONTAINING MELAMINE FORMALDEHYDE WASTE

Sasiprapa Srichaiyo⁽¹⁾, Chalermchai Chaitongrat⁽²⁾, Kanchala Sudtachat⁽³⁾,
Somsak Siwadamrongpong⁽⁴⁾

^(1,3,4)School of Manufacturing Engineering.

Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.

⁽²⁾School of Mechanical Engineering.

Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.

111 University Avenue, Muang District, Nakhonratchasima 30000, Thailand.

Corresponding author: somsaksi@sut.ac.th.

ABSTRACT

This paper presents the investigation of compressive strength and water absorption of cellular lightweight concrete containing melamine formaldehyde (MF) waste. The MF waste was used two types consist of MF waste granule and MF waste powder. River sand was replaced by 25% MF. The variation of gradation ratio between MF waste granule and MF waste powder (granule: powder) 100:0, 50:50, 75:25, 85:15, 90:10 and 0:100. Determination of density equal to 1300 kg/m³ and constant water-to-cement ratio of 0.5. After curing age of 28 days the specimen was tested the compressive strength and water absorption. It was found that the cellular lightweight concrete containing MF waste makes compressive strength and water absorption trend to increasing when the amount of MF waste increased. It could be explained with the reason as follows, the combination of sand and MF waste, caused the better gradation. The shape of MF has rough surface and angle particles thus has more surface effect to bonding between cement and MF waste increased. The cellular lightweight concrete containing MF waste granule and powder together at ratio of cement: sand: MF waste granule: MF waste powder: water equal to 1: 0.75: 0.225: 0.025: 0.5 respectively is best admixture in this studies. The compressive strength was higher than that of Thai Industries Standard (TIS 2601-2556) and ASTM C129.

KEYWORDS: Melamine formaldehyde waste, lightweight concrete, compressive strength, water absorption

1. INTRODUCTION

In the present, the countries around the world interested to solving the waste problem. The most common waste is solid waste that increasing every year, particularly plastic due to the plastic was used in more daily life. When, these plastic were discarded as waste and it must be eliminated. Which, if the plastic remain in nature or other places, it created the environmental problems.

Plastic was used in all industries with applications. It is easy forming, low cost and features a wide range. The plastic were separated two types consist of thermoplastic and thermosetting plastic. The thermoplastic could be recycled by melting again, but thermosetting plastic could not be melted due to molecular chains tightly bonded with cross-link. The disposal process could be done in term of incinerating or dumping on the landfills which both methods can be disposed a large amount of waste, but it might affect to environment if used wrong elimination.

The recycling is waste disposal an interesting alternative for plastic waste. The researchers studied the possibility of bringing plastic waste as material to mix with concrete which could be possible. Example of plastic waste were used in concrete mixing, Polyethylene Terephthalate (PET) bottle waste was used as aggregate in mixing concrete by crushing made small size. It was found that the weight of concrete and strength of concrete decreases, water absorption increasing when PET waste increased Albano, et al. (2009), ArÇaözöglu, et al. (2010), Azhdarpour, et al. (2016).

Thermosetting plastic such as melamine formaldehyde (MF) mostly used to produce containing foods by compressing process. Phaiboon, et al. (2007), MF waste was used as lightweight aggregate in mixing concrete and it was expected to add value of MF waste by using as mixture for lightweight concrete production.

The 11th SEATUC Symposium

Results shown that low density along with the compressive strength reduced but acceptable compressive strength which closes to ASTM C129. Dweik, et al. (2008) was studied the replacing sand by MF waste as coarse aggregate in mixing concrete which the results shown the replacing sand with MF 30% by volume to maximum compressive strength.

Chalermchai, et al. (2016), investigated of replacing sand by MF waste as aggregates in cellular lightweight concrete. MF waste was used two types consist of MF waste granule and MF waste powder. The replacement of sand by MF waste equal to 0, 15, 25 and 35% by volume at densities of 1100 and 1300 kg/m³. From experimental results, they found that lightweight concrete containing MF waste makes the compressive strength and water absorption increase when compared with lightweight concrete without MF waste. The MF waste 25% has maximum compressive strength particularly the lightweight concrete contains MF waste powder which water absorption higher than the standard. The lightweight concrete contains MF waste granule has compressive strength lower than the lightweight concrete contains MF waste powder but water absorption less than the determined standard. However during the tableware production process, a large amount of scrap waste (granule waste) has 1 ton per day and larger than MF waste powder. That, if the recycle scrap has increased, it would greatly reduce waste and lower disposal costs.

Therefore this study focuses on utilizing more granular waste. It is expected that improvement of compressive strength and water absorption could be obtained by using combination of MF waste granule and MF waste powder together in the replacing sand of 25%. The ultimate aim of the research is lightweight concrete with compressive strength and water absorption meets the requirement of TIS 2601-2556 standard.

2. EXPERIMENT

2.1. Materials

The materials were used in this research including cement, sand, water, MF waste and foaming agent.

2.1.1 Cement was used Portland cement type 1 according to ASTM C150-94

2.1.2 River sand was sieved through a sieve No.16 as fine aggregate (follow ASTM C 33) which has fineness modulus of 1.42, distribution particle size as show in figure 2, specific gravity of 2.52 and water absorption of 0.33%. Sand has a rounded shape and smooth surface present in figure 1.

2.1.3 Water is clean tap water without contaminants that might be harmful to concrete.

2.1.4 Foaming agent is synthetic foaming agent anionic type.

2.1.5 MF waste was obtained from Srithai superware public company limited which were used two forms. MF waste granule (Fig.3a) get from crushing scrape in hot compression process would occur by mean of being forced

out from the mold, causing a large amount of defects. Other, MF waste powder (Fig.3b) was derived from polishing tableware process. The physical and mechanical properties of melamine shown in table 1.



Fig. 1 SEM image of sand

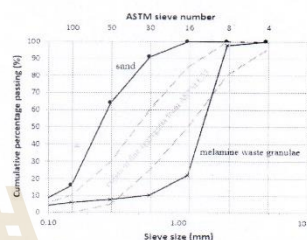


Fig. 2 Gradation curves of sand and MF waste granule

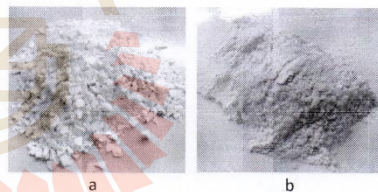


Fig. 3 MF waste granule and melamine waste powder

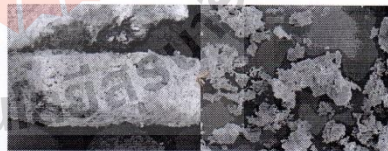


Fig. 4 SEM image of MF waste granule and powder
MF waste granule is flaky shape and rough surface (Fig. 4a) which has fineness modulus equal to 3.56,

The 11th SEATUC Symposium

distribution of particle size as shown in figure 1, the specific gravity of 1.5 and water absorption of 5.51%.

MF waste powder is dust or powder which has particle size equal to 34 micrometers and the characteristics of MF waste powder present in figure 4b

Table 1 Physical and mechanical properties of melamine

Specific gravity	1.47-1.52
Tensile strength	34-90 MPa
Compressive Strength	227-310 MPa
Flexural strength	62-110 MPa
Hardness	M115-M125
Impact energy	13.3 J/m
Flexural Modulus	7.58 GPa

2.2 Preparation of specimens

In this research, the partial river sand was replaced by melamine 25% as aggregate in cellular lightweight concrete. Specimens were prepared in laboratory and determination constant water to cement ratio of 0.5, Control density at 1300 kg/m³ according to TIS-2601 show in Table 3 and the mixing design shown in Table 2. The mixture name used abbreviations including MF0 is lightweight concrete without MF waste. MFG is lightweight concrete containing MF waste granule only and MFP is containing MF waste powder only, MFGP is lightweight concrete containing MF waste granule and powder mixed together which ratio of granule to powder equal to 50:50, 75:25, 85:15, 90:10 (The ratio calculated from the amount of sand replaced with melamine 25%.) the reason of combination MF waste because this research aims to utilizing granule more than powder thus the combination sand, MF waste granule and MF waste powder makes gradation of aggregate even better.

Method of mixing concrete begin with preparation materials and molds. All materials mixed in the mixer until the concrete mixture in cement paste. Next step pre-

formed foam method, mixing the foaming agent with water and then pour into foam generator. The density of lightweight controlling by using preknown-ware-volume which containing concrete in relation to weigh that using calculation density. When the required density of lightweight concrete was achieved. Then poured into molds and use steel rod jab to dispose air bubble within concrete after 1 hour decorates surface and hold concrete within molds until 24 hours before take out from the molds. After that, the specimens were protected by using plastic to wrap around in order to curing age of 28 days and then was tested.

Preparation molding, the compressive strength is used mold size of 50x50x50 mm made from cast brass and water absorption is used mold size of 100x100x100 mm made from cast iron

2.3 Testing method

Compressive strength testing methods, the specimen size of 50x50x50 mm at curing age 28 days according to ASTM C109-13 were tested to measuring maximum compression load (kN) by using the compression machine with the maximum load capacity of 200 kN. After that, compressive strength is calculated from the maximum load (kN) per unit area.

Water absorption testing methods, the specimen size of 100x100x100 mm at curing age 28 days according to ASTM 642-97. The water absorption (W_a) is tested for saturate mass (M_s) and dry mass (M_d) in order to calculate the water absorption following equation

$$W_a = \frac{M_s - M_d}{M_d} \times 100 \quad (1)$$

The standard used comparison compressive strength of lightweight concrete are TIS 2601-2556 (show in Table 3) and ASTM C129 (show in Table 4). The standard used comparison water absorption is TIS-2601 standard only

Table 2 Proportion of cellular lightweight concrete mixtures

Mixture name	MF0	MFG	MFP	MFGP
Cement(kg/ m ³)	412	412	412	412
Sand (kg/ m ³)	412	309	309	309
Melamine waste Granule (kg/ m ³)		103	0	51.5 77.3 85.5 92.7
Melamine waste powder (kg/ m ³)		0	103	51.5 25.7 15.5 10.3
Water (kg/ m ³)	206	206	206	206

Table 3 Lightweight concrete of type fill bubbles standard in Thai Industrial Standard (TIS 2601-2556)

Type	Density (kg/m ³)	Compressive strength (MPa)	Water absorption (%)
C9	801-900		
C10	901-1000	> 2.5	< 23%
C12	1001-1200		
C14	1201-1400	> 5.0	< 20%

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Compressive strength

The 11th SEATUC Symposium

Compressive strength results illustrated in Figure 5. Could be seen the increases compressive strength when the MF waste was increased to compare with lightweight concrete without MF waste (MF0). Lightweight concrete containing MF waste powder (MFP) has highest strength at average value of 7.56 MPa. Compressive strength of lightweight concrete containing MF waste granule (MFG) of 5.72 MPa. The MF waste granule and powder get together by emphasizing the use of granule waste was found compressive strength decreased, when the increasing ratio of granule to powder (granule: powder) and also comply the standard. This compressive strength increase could be explained by reason hereinafter.

(1) The MF waste powder has small size thus able to infiltrates into gap between cement and aggregate result to concrete more tightly and compressive strength increased. MF waste granule has flaky shape and rough surface makes bonding between cement and MF better. The MF waste granular and powder combined with sand would make a better gradation more than using sand only.

(2) The chemical composition of aggregate affects to bond strength and properties of layer between cement and aggregate. The chemical reaction of cement and aggregate

could cause the bond linked in a thin layer between cement paste and aggregate. Therefore, maybe there is a possibility that this reaction could occur between cement paste and melamine, which gives strength of concrete increases Dweik, et al. (2008), Chalermchai, et al. (2016). The standard references of lightweight concrete in this research have two standard including Thai Industries Standard (TIS 2601-2556) for Lightweight concrete of type filled with bubbles standard (Table 3) and Specification of non-load-bearing lightweight concrete ASTM C129 type II standard (Table 4). The comparison between test results and standards was found that all mixing containing MF waste pass standard

Table 4 Specification of non-load-bearing lightweight concrete (ASTM C129)

Type	Compressive strength (MPa)		Density (kg/m ³)
	Average of three units	Individual unit	
II	4.1	3.5	1680

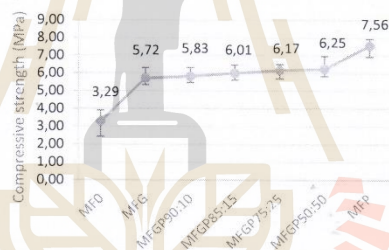


Fig. 5 The compressive strength of cellular lightweight concrete at 28 days

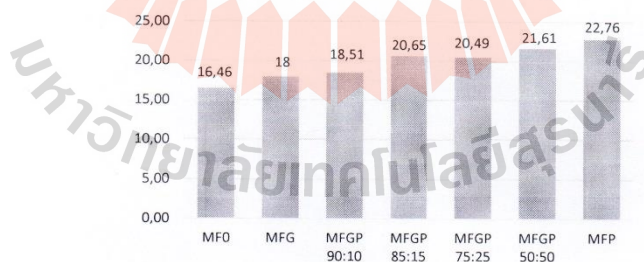


Fig 6 The water absorption of cellular lightweight concrete at 28 days

3.2 Water absorption

The 11th SEATUC Symposium

Water absorption results of lightweight concrete indicate in Figure 6. It can be seen that water absorption of lightweight concrete containing MF waste increased to compare with lightweight concrete without MF waste (MF0). TIS-2601-2556 standard determines water absorption for density of 1300 kg/m^3 not more than that of 20%. Mixture are comply TIS 2601-2556 standard consist of MF0, MFG and MFGP 90:10. The water absorption increasing when mixed MF waste could be explained by the reason following, MF waste has properties of water absorption more than sand, which makes the water absorption of lightweight concrete increasing. MF waste powder has water absorption more than MF waste granule because powder small particle size to make more surface area. MF waste powder rarely increase together with MF waste granule decrease affect to increasing water absorption.

3.3 The analysis of image from Optical microscope of lightweight concrete

The specimens were cut to analyzing cross-sectional images of lightweight concrete by optical microscope with a magnification of 5 displayed on figure 7. It is seen that lightweight concrete containing MF waste shown the homogenization more than lightweight concrete without MF waste. Due to MF waste has good distribution and mixing melamine causes a gap between cement and aggregate less than mixing the sand only. Generally, round shape particle have distribute as good although MF has a somewhat flaky shape but fragmentation good. MF waste granule has a posing vertically in the same direction as providing compression load which could be that enables strengthen of lightweight concrete.

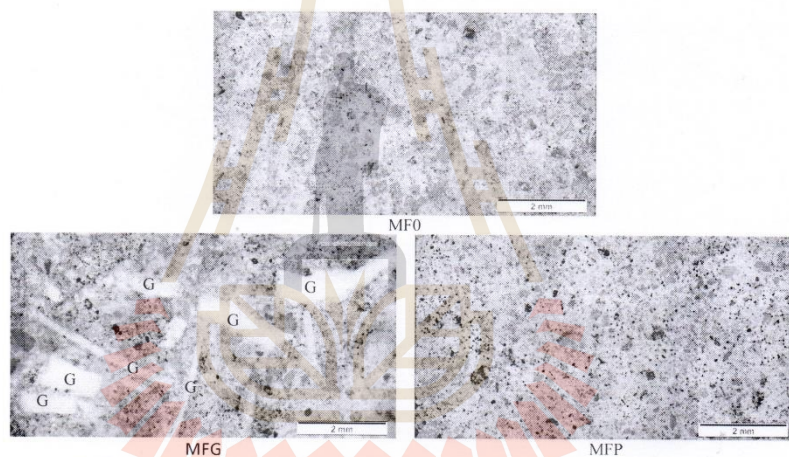


Fig. 7 Microstructure of lightweight concrete by optical microscope (G=Melamine waste granule)

4. CONCLUSION

(1) The utilization of MF waste by replacing sand of 25% as aggregate in lightweight concrete could be improved the strength. Which could be explained by reasons below,

The mixing melamine waste granule and powder together make gradation of aggregate better resulted to compacting and increasing strength of concrete.

The chemical composition between cement and MF waste makes occurred bonding link in thin layer at the cement-MF waste interface thus rendering the strength increased.

Comparison the compressive strength between testing results and standard which could be seen that all mixture comply both ASTM C129 and TIS 2601-2556.

(2) The water absorption of lightweight concrete containing MF waste more than lightweight concrete without MF waste because MF waste has water absorption more than sand thus effect on water absorption increasing. Some admixtures meet the requirements of TIS 2601-2556 standard such as MF0, MFG and MFGP 90:10.

(3) The best mixture of this research is lightweight concrete containing MF waste granule 90% and MF waste

The 11th SEATUC Symposium

powder 10% in replacing sand 25% (MFGP 90:10). Because the compressive strength and the water absorption that meets the requirements of standard and achieving the objective of the research that focuses on the use of MF waste granule and powder to recycling two form of waste.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like thank Suranaree University of Technology and National Research Council of Thailand for support grant to conducting this research and thankful Srithai superware public company limited for assistance of the melamine waste.

REFERENCES

- C. Albano, N. Camacho, M. Hernández, A. Matheus, A. Gutiérrez, "Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios." Waste Management 29, 2707-2716, 2009
- Semiha AkÇaözöglü, Cengiz Duran Atiş, Kubilay AkÇaözöglü, "An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete," Waste management 30, 285-290, 2010
- Amir M. Azhdarpour, Mohammed R. Nikoudel, Milad Taheri, "The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation," Construction and Building Material 109, 55-62, 2016
- Phaiboon P., Mallika P., "Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete," Waste Management 28, 1581-1588, 2007
- Hasan S. Dweik, Mohamed M. Ziara and Mohamed S. Hadidoun, "Enhancing Concrete Strength and Thermal Insulation Using Thermoset Plastic Waste." International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials, vol. 57, pp. 635-656, 2008
- Chalermchai C., "Influence of Melamine formaldehyde waste on mechanical properties of lightweight concrete," Degree of Doctor of Philosophy, Mechanical Engineering, institute of engineering, Suranaree University of Technology, 2016
- Annual Book of ASTM Standard, 1994, Specification for Portland Cement, ASTM C150-94
- Annual Book of ASTM Standard, 1992, Specification for Fine and Coarse Aggregate, ASTM C33
- Annual Book of ASTM Standard, 2002, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, ASTM C109
- Annual Book of ASTM Standard, 1997, Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM C642
- Secification for Nonloadbearing Concrete Masonry Units, ASTM C129
- Ministry of Industry, 2013, Cellular Lightweight Concrete Blocks using Preformed Foam, Thai Industrial Standard 2601-2013, Bangkok, Thailand.

PHOTOS AND INFORMATION



Sasirapa Srichaiyo received the B.E. (2014) degree in manufacturing engineering from Suranaree university of technology. She is studying in degree of master, School of Manufacturing Engineering, Suranaree university of technology



Chalermchai Chaitongrat received the B.E. (2008) and M.E. (2011) degree in mechanical engineering from Suranaree university of technology. He is studying in degree of Ph.D. School of Mechanical Engineering, Suranaree university of technology



Kanchala Sudtachat received the B.E. (2002), M.E. (2005), and D.E. (2014) degrees in Industrial Engineering from Clemson University. She is a lecturer, School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology.



Somsak Siwadamrongpong received the B.E. (1995) degree in Mechanical Engineering from Chulalongkorn University, M.E. (2001) degree in Environmental System from Nagaoka University of Technology, and D.E. (2004) degree in Energy and Environment from Nagaoka University of Technology. He is a lecture, School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี >>>>>

ที่ วร 104 / 2560

18 กรกฎาคม 2560

เรื่อง ตอบรับตีพิมพ์บทความลงในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

เรียน นางสาวศศิประภา ศรีไชโย

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเรื่อง "การใช้ประโยชน์เศษเมลามีนเป็นมวลรวมละเอียดในคอนกรีตมวลเบา" เพื่อขอตีพิมพ์ลงในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี ทางกองบรรณาธิการได้พิจารณาแล้ว เห็นควรให้ตีพิมพ์ลงในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม - ธันวาคม 2560 ต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชวลิต แสงสวัสดิ์)

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชภัฏธนบุรี ถนนรังสิต-นครนายก (กม.13) อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

โทรศัพท์: 0 2549 3493 โทรสาร: 0 2549 3493 e-mail: enjournal@en.rmutt.ac.th

www.engineer.rmutt.ac.th/journal

ประวัติผู้เขียน

นางสาวศศิประภา ศรีไชโย เกิดเมื่อวันที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2535 ศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านปอพราน ชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียน โชคชัยสามัคคี จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต “เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง” จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2557 ในระหว่างการศึกษาระดับปริญญาตรีได้สหกิจศึกษา ณ บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ตำแหน่งผู้ช่วยวิศวกร ในแผนก Tooling and development เป็นเวลา 4 เดือน

ปี พ.ศ. 2558 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา โดยได้รับทุนการศึกษา “ทุนกิตติบัณฑิต” จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขณะที่ศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิตนั้น ได้มีประสบการณ์โดยเป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชา ดังนี้

- 1) สถิติและวิธีเชิงตัวเลข
- 2) ปฏิบัติการวัดละเอียด
- 3) การผลิตโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วย (CAD/CAM)
- 4) คอมพิวเตอร์เพื่อการออกแบบเบื้องต้น
- 5) ปฏิบัติการสร้างต้นแบบผลิตภัณฑ์

ในระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโทได้นำเสนอผลงานทางวิชาการ ตามที่ได้นำเสนอแสดงในภาคผนวก ข