

การศึกษาขนาดอนุภาคเศษเมลามีนที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด  
ของคอนกรีตมวลเบา



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2561

**THE STUDY OF PARTICLE SIZES OF MELAMINE  
WASTE ON COMPRESSIVE STRENGTH OF  
LIGHTWEIGHT CONCRETE**



**Pronpan Choedchai**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Mechanical and Process System**

**Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2018**

การศึกษาขนาดอนุภาคเศษเมลามีนที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด  
ของคอนกรีตมวลเบา

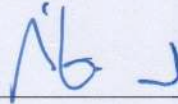
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



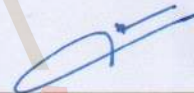
(ผศ. ดร. จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร. กัญชลา สูดตาชาติ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



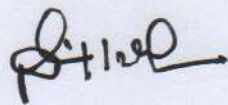
(ผศ. ดร. วรณวนษ์ บุ่งสุต)

กรรมการ



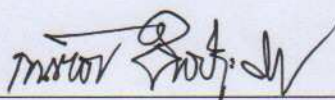
(อ. ดร. สมศักดิ์ ศิวคำรังพงษ์)

กรรมการ



(ส. ดร. สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร. กนัศร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พรพรรณ เฉิดฉาย : การศึกษาขนาดอนุภาคเศษเมลามีนที่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา (THE STUDY OF PARTICLE SIZES OF MELAMINE WASTE ON COMPRESSIVE STRENGTH OF LIGHTWEIGHT CONCRETE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญชลา สูดตาชาติ, 80 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคเศษของเสียเมลามีนที่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา และศึกษาแนวทางการนำไปใช้งานของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่เหมาะสมตามมาตรฐานอุตสาหกรรมคอนกรีตมวลเบา โดยเศษเมลามีนที่ใช้ในงานวิจัยได้จากผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตจะถูกนำมาบดทำลายเรียกว่าเศษของเสียเมลามีน (Melamine Formaldehyde Waste Defect) โดยการนำเศษของเสียเมลามีนเข้ามาแทนที่ทราย 25 % โดยน้ำหนัก กำหนดอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ต่อมวลรวมรวมเท่ากับ 1:2:2 ความหนาแน่นของคอนกรีตสดถูกควบคุมที่ 1,100 และ 1,300 kg/m<sup>3</sup> ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus: FM) ของขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 เท่ากับ FM1.25, FM1.00, FM0.75 และ FM0.50 ทดสอบกำลังรับแรงอัดชิ้นงานทดสอบที่อายุการบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วันจะถูกนำมาทดสอบและทดสอบการดูดซึมน้ำชิ้นงานทดสอบที่อายุการบ่ม 28 วันจะถูกนำมาทดสอบ ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดพบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียเมลามีนให้กำลังรับแรงอัดที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาควบคุม ค่าโมดูลัสความละเอียดของเศษของเสียเมลามีนเท่ากับ FM0.75 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดและค่าการดูดซึมน้ำของทุกตัวอย่างสามารถนำไปใช้งานตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก เลขที่. 2601-2556) ผลที่ได้จากการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้แสดงถึงประโยชน์สำหรับการปรับปรุงขนาดละเอียดสำหรับเป็นมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายของคอนกรีตมวลเบาเป็นการลดการใช้ทรายซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติ รวมถึงการใช้ประโยชน์ของเสียโดยการนำกลับมาใช้ใหม่ในคอนกรีตมวลเบา นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาต่อยอดให้ผลิตคอนกรีตมวลเบาในเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคตได้

สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต  
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา พรพรรณ  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา กชจ

PRONPAN CHOEDCHAI : THE STUDY OF PARTICLE SIZES OF  
MELAMINE WASTE ON COMPRESSIVE STRENGTH OF  
LIGHTWEIGHT CONCRETE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.  
KANCHALA SUDTACHAT, Ph.D., 80 PP.

MELAMINE WASTE DEFECT/COMPRESSIVE STRENGTH/WATER ABSORPTION  
/LIGHTWEIGHT CONCRETE

This research presents the investigation influence of melamine waste particle on compressive strength in lightweight concrete. The melamine waste was utilized as fine aggregate in lightweight concrete and evaluated, according to the standard of lightweight concrete industry. The melamine formaldehyde waste was received from melamine product which was failed from quality inspection and crushed into pellets. Natural sand was replaced by melamine waste 25% by weight and the ratio of water to cement to aggregate was 1:2:2. Fresh concrete density was controlled at 1,100 and 1,300 kilogram per cubic meter. The concrete specimens were varied by fineness modulus (FM) of the waste according to ASTM C33, FM1.25, FM1.00, FM0.75 and FM0.50. Compressive strength testing of the specimens was carried out at curing age of 3 7 14 28 and 60 days, and water absorption test was done on 28 days of curing age specimens. The results revealed that lightweight concrete containing melamine waste exhibited higher of compressive strength compare to reference lightweight concrete. The higher was found in specimens with fineness modulus of FM 0.75. The water absorption of all specimens conformed to Thai Industrial Standard (TIS 2601-2556) in term of compressive strength and water absorption for both density. The results of this study were indicated advantage of grading as a fine aggregate for replacing the sand for lightweight concrete. It revealed utilization potential reduced of the waste by reusing in lightweight concrete, lead to reduction of sand using. Moreover, this research could also be

further developed to produce commercial lightweight concrete containing melamine waste in the future.



School of Manufacturing Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature ณัฐพร ศรีสุข

Advisor's Signature กบ จ

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้มีอาจสำเร็จลุล่วงไปได้หากปราศจากความอนุเคราะห์จาก บุคคลและกลุ่มบุคคลที่ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่งทางด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ สนับสนุนทุน และอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการดำเนินงานวิจัยเป็นอย่างดีเสมอมา ดังนี้

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึงบุคลากรประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตที่มอบโอกาสทางการศึกษา รวมถึงนางสาวหนึ่งฤทัย งามแสง และนายจิระ วงศ์พรหม บุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ให้ความช่วยเหลือในการเข้าใช้ สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญชลา สุตตาชาติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ ที่ประสาทวิชาความรู้ ให้คำแนะนำ คำปรึกษา อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหา ต่างๆในการทำงานวิจัยและให้ความช่วยเหลือที่ติดต่อมา รวมทั้งช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จนสำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณบริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุในการทำวิจัย รวมทั้ง ข้อมูลที่จำเป็นต่องานวิจัยและคำแนะนำต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา ตลอดจน ครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ให้คำแนะนำข้อคิดเห็นต่างๆและถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดี จนกระทั่ง งานวิจัยนี้เกิดผลสำเร็จ

พรพรรณ เนติฉาย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ง
สารบัญ .....	จ
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญรูป .....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	๓
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย .....	2
1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย .....	3
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย .....	3
1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย .....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
<b>2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 บทนำ .....	5
2.2 เมลามีนฟอรั่มัลดีไฮด์ .....	5
2.2.1 อันตรายของเมลามีน .....	6
2.2.2 ประโยชน์ของเมลามีน .....	7
2.3 คอนกรีตมวลเบา .....	8
2.4 มวลรวม .....	11
2.4.1 ขนาดใหญ่สุดของมวลรวม .....	12
2.4.2 ขนาดคละ .....	14



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.3	ค่าโมดูลัสความละเอียด .....	18
2.5	ส่วนประกอบของคอนกรีตมวลเบา .....	20
2.5.1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ .....	20
2.5.2	น้ำ .....	21
2.5.3	ทราย .....	21
2.5.4	สารเพิ่มฟอง .....	22
2.6	ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	23
2.7	สรุป .....	30
<b>3</b>	<b>วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1	บทนำ .....	31
3.2	วัสดุ .....	34
3.2.1	ปูนซีเมนต์ .....	34
3.2.2	น้ำ .....	35
3.2.3	ทราย .....	35
3.2.4	เศษของเสียมลามีน .....	35
3.2.5	สารเพิ่มฟอง .....	40
3.3	เครื่องมือและอุปกรณ์ .....	40
3.3.1	เครื่องบดผงละเอียด .....	40
3.3.2	เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน .....	41
3.3.3	เครื่องสร้างโฟมและเครื่องอัดอากาศ .....	41
3.3.4	เครื่องชั่งน้ำหนักและภาชนะที่ทราบปริมาตร .....	42
3.3.5	เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด .....	42
3.3.6	เตาอบลมร้อน .....	42
3.3.7	แบบหล่อมาตรฐาน .....	43
3.4	การทดสอบสมบัติของวัสดุ .....	43
3.4.1	การวิเคราะห์ขนาดคละ .....	43
3.4.2	การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุ .....	46

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5	การขึ้นรูปขึ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบา .....	46
3.5.1	การออกแบบส่วนผสม .....	46
3.5.2	การเตรียมโฟม .....	46
3.5.3	การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ .....	46
3.5.4	การบ่มขึ้นทดสอบ .....	47
3.6	การทดสอบคอนกรีตมวลเบา .....	48
3.6.1	การทดสอบกำลังรับแรงอัด .....	48
3.6.2	การทดสอบการดูดซึมน้ำ .....	48
3.7	การวิเคราะห์ระดับจุลภาค .....	49
3.7.1	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง .....	49
3.8	สรุป .....	49
<b>4</b>	<b>ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>	
4.1	บทนำ .....	50
4.2	ผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดคละของเศษของเสียมเมลามีนต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา .....	50
4.2.1	ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบา .....	50
4.2.2	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา .....	53
4.2.3	อิทธิพลของขนาดคละของเศษของเสียมเมลามีนต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา .....	57
4.2.4	การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา .....	70
<b>5</b>	<b>สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1	สรุป .....	71
5.1.1	ผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดคละของเศษของเสียมเมลามีน (Defect Melamine) ต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา .....	71
5.1.2	ผลการเปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา .....	71

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2 ข้อเสนอแนะ .....	73
รายการอ้างอิง .....	74
ภาคผนวก บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ระหว่างศึกษา .....	78
ประวัติผู้เขียน .....	80



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	สมมุติหีนมีรูปร่างเป็นทรงลูกบาศก์ ..... 12
2.2	การเรียงตัวของขนาดคละที่ต่างกัน ก.ขนาดเดียว ข.ขนาดคละต่อเนื่อง..... 12
2.3	อันตรายของเมลามีน ..... 16
2.3	แผนภูมิขนาดคละของมวลรวม ..... 16
2.4	ก. ตัวอย่างแผนภูมิขนาดคละของมวลรวมที่มีขนาดคละได้ตามกำหนด ..... 17
2.4	ข. ตัวอย่างแผนภูมิขนาดคละของมวลรวมที่มีขนาดคละไม่ได้ตามกำหนด ..... 17
3.1	แผนการดำเนินงานวิจัย ..... 33
3.2	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เอสซีจี ไฮบริด ..... 34
3.3	ภาพถ่ายของปูนซีเมนต์ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า ..... 34
3.4	ภาพถ่ายของทรายด้วย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า ..... 35
3.5	เศษของเสี้ยนเมลามีน ..... 36
3.6	สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ ..... 40
3.7	เครื่องบดผงละเอียด ..... 40
3.8	เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน ..... 41
3.9	เครื่องอัดอากาศและเครื่องสร้างฟองโฟม ..... 41
3.10	เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด ..... 42
3.11	แบบหล่อมาตรฐาน ..... 43
3.12	ขนาดคละของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C33 ..... 44
3.13	การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ ..... 47
3.14	การบ่มขึ้นทดสอบด้วยพลาสติก ..... 47
3.15	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง ..... 49
4.1	ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m <sup>3</sup> ..... 52

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m <sup>3</sup> .....	52
4.3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m <sup>3</sup> .....	54
4.4 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m <sup>3</sup> .....	55
4.5 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m <sup>3</sup> อายุบ่ม 28 และ 60 วัน .....	56
4.6 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m <sup>3</sup> ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน .....	56
4.7 ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่า ของมวลรวมเศษของเสียมะลามีนที่ FM1.25 .....	58
4.8 ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่า ของมวลรวมเศษของเสียมะลามีนที่ FM1.00 .....	59
4.9 ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่า ของมวลรวมเศษของเสียมะลามีนที่ FM0.75 .....	60
4.10 ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่า ของมวลรวมเศษของเสียมะลามีนที่ FM0.50 .....	61
4.11 ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่าของมวลรวมทราย .....	62
4.12 ก) ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่าของคอนกรีตมวลเบา ผสมเศษของเสียมะลามีน FM1.25 ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m <sup>3</sup> .....	63
4.12 ข) ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่า (แบบมีสเกลวัด) ของคอนกรีตมวลเบา ผสมเศษของเสียมะลามีน FM1.25 ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m <sup>3</sup> .....	64
4.13 ก) ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่าของคอนกรีตมวลเบา ผสมเศษของเสียมะลามีน FM1.00 ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m <sup>3</sup> .....	64

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ข) ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่า (แบบมีสเกลวัด) ของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมลามีน FM1.00 ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m <sup>3</sup> .....	65
4.14 ก) ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่าของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมลามีน FM0.50 ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m <sup>3</sup> .....	66
4.14 ข) ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่า (แบบมีสเกลวัด) ของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมลามีน FM0.50 ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m <sup>3</sup> .....	66
4.15 ก) ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่าของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมลามีน FM0.75 ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m <sup>3</sup> .....	67
4.15 ข) ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่า (แบบมีสเกลวัด) ของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมลามีน FM0.75 ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m <sup>3</sup> .....	67
4.16 ก) ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่าของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมลามีน FM0.75 ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m <sup>3</sup> .....	68
4.16 ข) ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่า (แบบมีสเกลวัด) ของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมลามีน FM0.75 ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m <sup>3</sup> .....	68
4.17 การดูซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมลามีนที่ความหนาแน่น 1,100 1,100 kg/m <sup>3</sup> .....	70
4.18 การดูซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมลามีนที่ความหนาแน่น 1,300 1,100 kg/m <sup>3</sup> .....	70

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\alpha$	=	significant level
ASTM	=	American society for testing and materials
$\text{CaCN}_2$	=	แคลเซียมไซยาไนด์
$\text{CaO}$	=	แคลเซียมออกไซด์
$\text{Ca(OH)}_2$	=	แคลเซียมไฮดรอกไซด์
$\text{C}_3\text{A}$	=	ไตรแคลเซียมอลูมิเนต
$\text{C}_4\text{AF}$	=	เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์
$\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$	=	เมลามีน
$\text{CH}_2\text{O}$	=	ฟอร์มัลดีไฮด์
$\text{C}_2\text{S}$	=	ไดแคลเซียมซilikेट
$\text{C}_3\text{S}$	=	ไตรแคลเซียมซilikेट
DOE	=	design of experiment
FM	=	โมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus)
HDPE	=	พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง
GBFS	=	Granulated Blast-Furnace Slag
$\text{kg/m}^3$	=	kilogram per cubic meter
LDPE	=	พอลิเอธิลีนความหนาแน่นต่ำ
MF	=	melamine formaldehyde
MFG	=	melamine formaldehyde waste granule
MPa	=	mega Pascal ( $1 \text{ MPa} = \times 10^6 \text{ N/m}^2$ )
OPC	=	ordinary portland cement
PC	=	พอลิคาร์บอเนต
PET	=	polyethylene terephthalate
PVC	=	พอลิไวนิลคลอไรด์
SEM	=	scanning electron microscope
$S_g$	=	ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

SCC	=	Self-compacting concrete
MSand	=	manufactured sand
SSD	=	saturate surface
$\mu\text{m}$	=	micrometer หรือ micron ( $1 \text{ micron} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$ )
WPLA	=	Waste Polyethylene Terephthalate Bottles Lightweight Aggregate
WPLAC	=	Waste PET Bottles Lightweight Aggregate Concrete
w/c	=	Water-to-cement ratio
W/m. $^{\circ}\text{C}$	=	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

ในปัจจุบันการใช้งานพลาสติกมีแนวโน้มสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดขยะจำพวกพลาสติกปริมาณมาก โดยเฉพาะขยะประเภทพลาสติกเทอร์โมเซตติง (Thermosetting plastic) เช่น เมลามีน พอร์มาดิไฮด์, ฟีนอลพอร์มาดิไฮด์, อีพ็อกซี และพอลิเอสเตอร์ เป็นต้น ซึ่งเป็นพลาสติกที่มีสมบัติพิเศษ คือทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและทนปฏิกิริยาเคมีได้ดี ทำให้วิธีการกำจัดขยะประเภทนี้เป็นไปได้ยาก เนื่องจากไม่สามารถนำมาหลอมละลายทางความร้อนเพื่อขึ้นรูปใหม่ได้ (ชารา, 2557) โดยทั่วไปก็จะกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบหรือการเผาเป็นเชื้อเพลิงและมีอีกแนวทางหนึ่งก็คือการนำไปกักเก็บพลาสติกเทอร์โมเซตติงผสมในซีเมนต์เป็นหนึ่งใน solidification หรือการหล่อเป็นมวลรวมในก้อนแข็ง

เมลามีนพอร์มาดิไฮด์ก็เป็นเทอร์โมเซตติงประเภทหนึ่งที่ไม่สามารถนำไปรีไซเคิลได้ ซึ่งเราจะใช้ในงานวิจัยนี้ มาจากอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องใช้ในครัวเรือน ของเสียจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เหล่านี้ประมาณ 3 ตันต่อวัน ตัวอย่างเช่นผลิตภัณฑ์เมลามีนซึ่งทำการขึ้นรูปจากวัตถุดิบมาเป็นผลิตภัณฑ์ ในการผลิตก็จะมีของเสียจำพวกเศษครีบจากกระบวนการอัดขึ้นรูปและเศษของเสียจากการผลิตของเสียเหล่านี้ก็จะถูกกำจัดโดยวิธีการฝังกลบหรือเผาขยะ ในงานวิจัยนี้จะพยายามนำเศษเมลามีนนี้กลับมาใช้ใหม่โดยใช้เป็นมวลรวมในคอนกรีตมวลเบา

ในงานวิจัยก่อนหน้านี้นี้มีการนำของเสียเทอร์โมเซตติงกลับมาใช้ใหม่โดยการนำมาเป็นวัสดุมวลรวมในคอนกรีตมวลเบา (Great-PET, Choi, Yun-Wang, et al., 2560) อีกทั้งพลาสติกจำพวกเมลามีนเป็นที่สนใจและถูกนำมาศึกษาโดยการนำมาผสมในคอนกรีต (Batayneh, Malek, Iqbal Marie, and Ibrahim Asi, 2555) โดยที่การใช้คอนกรีตมวลเบาเป็นทางเลือกใหม่ต่ออุตสาหกรรมก่อสร้างในประเทศไทย คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเป็นคอนกรีตที่มีส่วนผสมของฟองอากาศซึ่งเกิดจากการเติมโพลีเมอลวคงรูปที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีตแทนการใช้หินหรือมวลรวมหยาบ การประยุกต์ใช้คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสสำหรับการก่อสร้างมีข้อได้เปรียบกว่าคอนกรีตปกติเช่น ลดการใช้พลังงานในอาคารเมื่อนำมาใช้เป็นผนังอาคาร มีความทนไฟ ลดน้ำหนักของโครงสร้าง (Panyakapo, Phaiboon, and Mallika Panyakapo, จารุพันธ์ และ เกรียงศักดิ์, 2556 )

อีกทั้งคณะวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้มีการนำเศษเมลามีนมาใช้ประโยชน์แทนทรายในคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส ซึ่งส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตการผสมแบบฝุ่นให้ความแข็งแรงกว่าแบบเม็ด(เศษครีบ) และงานวิจัย Chalermchai Chaitongrat and Somsak Siwadamrongpong,

2558) นำเศษเมลามีนมาแทนที่ทรายที่ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักผลการทดสอบพบว่าผลการรับแรงอัดเพิ่มขึ้นมีสาเหตุมาจากขนาดคละของมวลรวมเศษของเสียเมลามีนที่ดีขึ้น งานวิจัยของ S. Srichaiyo, C. Chaitongrat and S. Siwadamrongpong, 2559) ในการผสมเม็ดและฝุ่นพบว่ายิ่งเศษเมลามีนเติมเข้าไปมีขนาดเล็กแสดงด้วยค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus :FM) ของขนาดคละที่มีค่าน้อยลง กำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นแต่การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แต่ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องใช้บนโต๊ะอาหารนอกจากเศษเมลามีนที่เกิดจากกระบวนการอัดขึ้นรูปทางความร้อนแล้ว ยังมีเศษเมลามีนที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้มาตรฐานไม่สามารถนำออกไปจำหน่ายที่ต้องทำลายทิ้งอีกเป็นจำนวนมาก หากสามารถนำมาใช้เป็นมวลรวมจะสามารถกำจัดขยะพลาสติก

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษาการนำเศษของเสียเมลามีนเข้ามาแทนที่ทรายในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์เนื่องจากปัญหาการผสมเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นมีปัญหาในเรื่องของการดูดซึมน้ำ ดังนั้นจึงมีแนวความคิดที่จะไม่ใช่เศษเมลามีนแบบฝุ่น แต่ใช้เศษเมลามีนแบบเม็ดแต่ปรับให้ได้ขนาดเล็กและมีค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus :FM) ของขนาดคละของเศษของเสียเมลามีนใกล้เคียงกับเศษเมลามีนแบบฝุ่น เพื่อนำมาผสมในคอนกรีตมวลเบา จึงทำการลดขนาดเศษขนาดคละเพื่อแก้ปัญหาเรื่องการดูดซึมน้ำ และศึกษาขนาดคละของเศษเมลามีนที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ จุดมุ่งหมายคือคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเศษเมลามีนที่สามารถรับกำลังแรงอัดได้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมไม่ผสมเศษเมลามีน ค่าการดูดซึมน้ำที่ได้มาตรฐานและสามารถผลิตคอนกรีตมวลเบาในเชิงพาณิชย์

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดคละในการใช้เศษเมลามีนที่ใช้เป็นมวลรวมในการแทนที่ทรายของคอนกรีตมวลเบา
- 1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนกับคอนกรีตควบคุม
- 1.2.3 เพื่อศึกษาแนวทางการนำไปใช้งานของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่เหมาะสมตามมาตรฐานอุตสาหกรรมคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

## 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/m<sup>3</sup>

- 1.3.4 ศึกษาที่อายุบ่ม 7, 14, 28 และ 60 วัน
- 1.3.5 ทดสอบกำลังรับแรงอัด และการดูดซึมน้ำ

#### 1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูล ปรัชศน์วรรณกรรม งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 กำหนดขอบเขตการทดลองและแผนการดำเนินงานวิจัย
- 1.4.3 ออกแบบวิธีการทดลองโดยใช้ (Design of experiment, DOE)
- 1.4.4 เตรียมอุปกรณ์และวัสดุทดสอบ

เศษของเสียมลามี้นำไปบดเป็นเศษเม็ด จากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis ,ASTMC33) เพื่อคัดแยกโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) ของขนาดละเอียดเท่ากับ FM1.25 ,FM1.00 ,FM0.75 และ FM0.50 เพื่อใช้เป็นวัสดุรวมละเอียดก่อนนำไปผสมในคอนกรีตมวลเบา

- 1.4.5 เตรียมขึ้นทดสอบโดยการผสมส่วนผสมตามแผนการออกแบบการทดลอง
- 1.4.6 หล่อขึ้นรูปขึ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเสียมลามีน
  - 1.4.6.1 แบบหล่อมาตรฐานขนาด 50 mm x 50 mm x 50 mm ทำจากทองเหลืองใช้สำหรับขึ้นรูปขึ้นทดสอบกำลังรับแรงอัด
  - 1.4.6.2 แบบหล่อมาตรฐานขนาด 100 mm x 100 mm x 100 mm ทำจากเหล็กหล่อใช้สำหรับขึ้นรูปขึ้นทดสอบการดูดซึมน้ำ
- 1.4.7 การทดสอบคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเศษของเสียมลามีน
  - 1.4.7.1 ทดสอบกำลังรับแรงอัด
  - 1.4.7.2 ทดสอบการดูดซึมน้ำ
- 1.4.8 วิเคราะห์ผลการทดลอง
- 1.4.9 สรุปผลการทดลอง
- 1.4.10 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์
- 1.4.11 เผยแพร่งานวิจัย

#### 1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

- 1.5.1 อาคารเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 5 และ 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 1.5.2 บริษัทศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน)

#### 1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.6.1 เครื่องมือสำหรับเตรียมวัสดุและขึ้นรูปชิ้นทดสอบ
- 1.6.1.1 เครื่องบดผงละเอียด (Recycling machinery) รุ่น N17
- 1.6.1.2 เครื่องร่อนแยกขนาด (Sieve shaker) ยี่ห้อ Retsch รุ่น AS200
- 1.6.1.3 ชุดตะแกรงร่อน (Sieve) ตามมาตรฐาน ASTM E11
- 1.6.1.4 เครื่องชั่งดิจิทัล
- 1.6.1.5 แบบหล่อมาตรฐาน
- 1.6.1.6 เครื่องสร้างโฟม (Foam generator)
- 1.6.1.7 เครื่องอัดอากาศ (Air compressor)
- 1.6.1.8 เครื่องมือสำหรับทดสอบสมบัติคอนกรีตมวลเบา
- 1.6.1.9 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machines capacity 100kN) รุ่น Model MUL-125 TTR/THAI กำลังสูงสุด 100 kN สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต
- 1.6.1.10 เตาอบลมร้อน (Hot air oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น BE-200

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 เข้าใจถึงสมบัติทางกล และสมบัติการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน
- 1.7.2 เข้าใจถึงอิทธิพลของโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus :FM) ที่ส่งผลต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนในการแทนที่ทราย
- 1.7.3 สามารถรีไซเคิลเศษเมลามีนประยุกต์ใช้ในคอนกรีตมวลเบา
- 1.7.4 สามารถพัฒนาไปสู่การผลิตคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเศษเมลามีนในเชิงพาณิชย์ที่ใช้งานได้ตามมาตรฐานคอนกรีตมวลเบา

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ในระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมาปัญหาสิ่งแวดล้อมและมลภาวะของโลกนับเป็นประเด็นที่มีการกล่าวถึงในทุกวงการ หลายองค์กรหรือหลายหน่วยงานต่างก็จัดให้มีการส่งเสริมและร่วมมือกันหาแนวทางที่จะลดปัญหาหรือลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ในส่วนของวงการก่อสร้างก็เช่นกัน นักวิจัยหลายท่านให้ความสนใจในการศึกษากระบวนการออกแบบและการรีไซเคิลมวลรวมของเสี้ยนในคอนกรีตที่คาดหวังว่าจะสามารถจัดการปัญหาสิ่งแวดล้อม ลดต้นทุนค่าใช้จ่าย รวมทั้งมีการใช้ทรัพยากรอย่างรู้คุณค่าและมีประสิทธิภาพในการก่อสร้าง(รศ ดร.ทิพวรรณ บุญเพิ่ม,2549) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เห็นถึงวิธีการจัดการเศษของเสี้ยนเมลามีนที่เป็นของเสียจากผลิตภัณฑ์เมลามีนที่ไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตเข้ามาใช้เป็นมวลรวมในคอนกรีตมวลเบา ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและปรีทัศน์วรรณกรรมที่มีความสำคัญต่องานวิจัย

#### 2.2 เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (Melamine formaldehyde)

เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เป็นพลาสติกที่นิยมนำมาใช้ผลิตเครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร อาทิเช่น จาน ชาม ช้อน เป็นต้น นอกจากนี้ยังเป็นส่วนประกอบหลักในการผลิตแผ่นฟอรัไมกา แผ่นไม้เมลามีนปูพื้น เป็นต้น(ศศิประภา,2559) เมลามีนเป็นสารอินทรีย์มีสูตรทางเคมีคือ  $C_3H_6N_6$

เมลามีนถูกค้นพบครั้งแรกโดยนักเคมีชื่อจัสติน วอน ลิบิก (Justin Von Liebig) เป็นชาวเยอรมัน ซึ่งในปี 1835 ได้ทำการสังเคราะห์เมลามีนโดยให้ความร้อนที่สูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของแคลเซียมไซยาไนด์ ( $CaCN_2$ ) เพื่อเปลี่ยนเป็นเมลามีน ต่อมาในปี 1935 เฮนเกล (Hengel) นำเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ไปผลิตเป็นเรซิน เมลามีนและฟอร์มัลดีไฮด์จะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80-100 °C จนเป็นเมธิลอลเมลามีน เมื่อให้ความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาควบแน่นเป็นเรซิน เรซินนี้จะยังไม่แข็งตัวเนื่องจากยังไม่มี การเชื่อม โยงพันธะจึงต้องเพิ่มความร้อนให้เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์กับเรซินเชื่อม โยงกันจนแข็งตัวเป็นเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (Melamine Formaldehyde Resins) ซึ่งเป็นพลาสติกเทอร์โมเซต ที่ไม่หลอมเหลว ไม่ละลาย มีผิวที่แข็งแรง ทนต่อการขีดข่วน ทนกรดได้ดี แต่ทนด่างได้ไม่ดีนัก ด้านทานการเกาะของคราบอาหาร ด้วยเหตุนี้จึงนิยมนำมาทำภาชนะดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ในการผลิตภาชนะเมลามีนมักมีการเติมสารตัวเติม เช่น เซลลูโลส ซิลิกา แก้ว และแอสเบสทอส เพื่อเพิ่มความสามารถการต้านทานความร้อนและการไหลในการฉีดเข้าแบบเพื่อขึ้นรูปต่าง ๆ (ปรีชา พหลเทพ, 2535)

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

ตารางที่ 2.1 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 ชั่งงานหนา 1/6 นิ้ว)	0.1-0.8%

ลักษณะทางกายภาพของเมลามีนคือเป็นของแข็งสีขาว ความหนาแน่น 1,574 kg/m<sup>3</sup> จุดหลอมเหลว 350 °C (หรือ 623 K หรือ 662 °F) จุดเดือดจะเกิดการระเหิด (Sublimes) ความสามารถในการละลายน้ำคือ 3.1 กรัมต่อลิตรที่อุณหภูมิ 20 °C เมลามีนละลายน้ำได้เพียงเล็กน้อย (สุรน เสดิธรยานนท์, 2551)

### 2.2.1 อันตรายของเมลามีน

ความเป็นอันตรายของเมลามีนจะมีความเป็นพิษต่ำ ไม่มีพิษต่อสารพันธุกรรม และไม่ปนสารก่อกลายพันธุ์หากได้รับอย่างต่อเนื่องอาจทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินปัสสาวะเช่น ไต กระเพาะปัสสาวะ โดยสารเมลามีนจะไปรวมตัวกับสารเคมีอื่นเช่น Cyan uric acid ซึ่งอาจกลายเป็นก้อนนิ่วอุดตันในระบบทางเดินปัสสาวะ และมีโอกาสเสี่ยงในการเกิดมะเร็งหรือไตวายได้ ค่าความปลอดภัยของสารเมลามีนที่องค์การอนามัยโลก กำหนดไว้สำหรับเด็กทารกคือ 0.5 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวของเด็กต่อการบริโภคหนึ่งวัน สำหรับผู้ใหญ่คือ 25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อน้ำหนักตัวต่อวัน อย่างไรก็ตามการ

รับประทานอาหารที่มีเมลามีนแต่ไม่เกินค่าความปลอดภัยร่างกายสามารถขับเมลามีนออกมาเองได้ (สุรน เสถียรยานนท์, 2551)

### 2.2.2 ประโยชน์ของเมลามีน

เมลามีนร่วมกับฟอร์มาลดีไฮด์ทำเป็น Melamine resin ซึ่งเป็น Thermosetting plastic และ Melamine foam เป็นสารพอลิเมอร์ใช้สำหรับทำความสะอาด ผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายของเมลามีน รวมถึงวัสดุผิวหน้าเคาน์เตอร์กระดานขาวที่ลบได้ กาว เครื่องครัว และสารหน่วงไฟ

การเลือกใช้ภาชนะเมลามีนที่มีเครื่องหมายมาตรฐานอุตสาหกรรมกำกับ ซึ่งได้รับการวิเคราะห์ทดสอบด้านความปลอดภัยเมื่อใช้บรรจุภัณฑ์หรือสัมผัสกับอาหารรวมทั้งสมบัติทางกายภาพในการใช้งานตามปกติต้องไม่มีสารที่สกัดได้ใดๆ ในปริมาณที่อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภคและภาชนะต้องมีคุณภาพที่ผ่านตามเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดไว้คือ เป็นการคุ้มครองผู้บริโภคในการใช้ผลิตภัณฑ์นั้นๆ ให้มากที่สุด เพราะอันตรายที่เกิดจากปริมาณสารที่สูงเกินมาตรฐาน ที่มาจากภาชนะเมลามีนซึ่งปนเปื้อนมากับอาหารมีอันตรายต่อร่างกายมาก ตัวอย่างเช่น

ฟีนอล ฟอร์มาลดีไฮด์และตะกั่ว เป็นต้น

สมบัติทางกายภาพของภาชนะเมลามีนต้องมีความทนกรดอ่อนๆ ได้เมื่อทดสอบแล้ว ต้องไม่มีจุดหรือรอยฝ้าขาวที่ผิวของภาชนะ ภาชนะเมลามีนต้องสามารถทนความร้อนและอุณหภูมิสูงๆ ได้ดีในช่วง 99-121 องศาเซลเซียส เมื่อทดสอบแล้วภาชนะเมลามีนต้องไม่แตก บิดเบี้ยว ร้าว หรือมีรอยตำหนิใดๆ ที่อาจเป็นผลเสียต่อการใช้งาน การดูดซึมน้ำของภาชนะเมลามีนต้องมีอัตราต่ำ เมื่อทดสอบแล้วการดูดซึมน้ำที่อุณหภูมิห้องของภาชนะเมลามีนต้องไม่เกินร้อยละ 0.8 และการดูดซึมน้ำเดือดของภาชนะเมลามีนต้องไม่เกินร้อยละ 1.0 ภาชนะเมลามีนต้องมีความทนทานต่อแรงกระแทกได้เป็นอย่างดี เมื่อทดสอบแล้วภาชนะต้องไม่ร้าวหรือแตก

ภาชนะเมลามีนที่ได้รับการทดสอบแล้วต้องมีความทนกรดอ่อนๆ ได้เป็นอย่างดี จึงสามารถนำไปบรรจุอาหารที่มีรสเปรี้ยว ซึ่งมีส่วนประกอบของกรดแอสซิดิกได้ สามารถทนความร้อนและอุณหภูมิสูงๆ ได้ดีทำให้ภาชนะเมลามีนมีรูปทรงคงตัวดีไม่แตกและบิดเบี้ยวได้ง่าย จึงเหมาะสมกับการนำไปบรรจุอาหารร้อน การดูดซึมน้ำของภาชนะเมลามีนที่ได้รับการทดสอบแล้วต้องมีอัตราต่ำ จึงเหมาะสมกับการนำไปบรรจุอาหารเหลวได้เป็นอย่างดี สมบัติการดูดซึมน้ำต่ำของภาชนะเมลามีนทำให้ภาชนะเมลามีนมีสภาพการเป็นฉนวนสูง (สุรน เสถียรยานนท์, 2551)

### 2.3 คอนกรีตมวลเบา (Lightweight concrete)

คอนกรีตมวลเบา (Autoclaved Aerated Concrete) เป็นวัสดุก่อที่มีการนำมาใช้ และเป็นที่ยอมรับมาก ขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากมีคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนได้มากกว่าวัสดุก่อชนิดอื่นที่มีมา โดยตัววัสดุเองมีส่วนผสมมาจาก ทราย ซีเมนต์ ปูนขาว น้ำ ยิปซัม และผงอลูมิเนียมผสมรวมกัน แต่ส่วนที่สำคัญที่สุดก็คือฟองอากาศเล็กๆ เป็นรูพรุนไม่ต่อเนื่อง (Disconnecting Voids) ที่อยู่ในเนื้อวัสดุประมาณ 75% ทำให้น้ำหนักเบา ซึ่งผลของความเบาจะช่วยให้ประหยัดโครงสร้าง อีกทั้งฟองอากาศเหล่านั้น ยังเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี คุณสมบัติเฉพาะของคอนกรีตมวลเบา ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา (Lightweight concrete)

รูปแบบกายภาพ	หน่วย
ค่าการถ่ายเทความร้อนรวม	32-42
ค่าการต้านทานความร้อน	0.58
ค่าการนำความร้อน	0.089-0.132
ค่าความจุความร้อน	น้อยกว่าอิฐมวลเบา 2.5 เท่า
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว	0.13
การหดตัวเมื่อแห้ง	0.2
การต้านทานแรงอัด ( $\text{kg/cm}^2$ )	40-50
ความแข็งแรงทางกล ( $\text{kg/cm}^2$ )	23

ที่มา : แนวทางการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างและฉนวนเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน (pp. 2-22 - 2-23)

คอนกรีตมวลเบาเป็นคอนกรีตที่มีความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป (เปรียบเทียบที่ขนาดเท่ากัน) คอนกรีตทั่วไปจะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง  $2,200 - 2,600 \text{ kg/m}^3$  แต่คอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นในช่วง  $400-1,800 \text{ kg/m}^3$  มักใช้เป็นวัสดุก่อผนังเหมาะสำหรับงานที่รับน้ำหนักหรือต้องการกำลังรับแรงอัดไม่มาก นิยมใช้ในงานโครงสร้างขนาดใหญ่และอาคารสูงเพื่อลดขนาดของโครงสร้าง คอนกรีตมวลเบาสามารถแบ่งตามวัสดุผสมเป็น 3 ประเภทดังนี้

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

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



- มวลรวมเบาที่ได้จากระบวนการผลิต ได้แก่ ดินเหนียวผสมสารก่อฟองอากาศ (Expanded clay aggregate)

- มวลรวมเบาที่ได้จากสารอินทรีย์ ได้แก่ ไม้ แกลบ ชานอ้อย

- มวลรวมเบาที่ได้จากของเหลือจากกระบวนการผลิต ได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) ที่ได้จากระบวนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน

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 (อภิรักษ์ ชาติกรมย์, 2557)

นอกจากนี้คอนกรีตมวลเบายังสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คอนกรีตมวลเบาแบ่งตามลักษณะการใช้งาน (ACI 211.2 - 18)

ประเภทของคอนกรีต	หน่วยน้ำหนัก (kg/m <sup>3</sup> )	กำลังรับแรงอัด (kg/cm <sup>2</sup> )
คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานฉนวนความร้อน	< 800	10-100
คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานก่อฉาบ	500-800	100-180
คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง	1,400-1,800	180-400

งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ (Cellular Lightweight Concrete, CLC) ซึ่งเป็นคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศโดยการสร้างฟองอากาศจากสารเพิ่มฟองผสมกับซีเมนต์เพสต์ ส่วนประกอบหลักคือซีเมนต์ ทราย น้ำ และฟองอากาศ ซึ่งไม่มีการเติมมวลรวมหายกลงไปในเนื้อคอนกรีต คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ดีกว่าคอนกรีตทั่วไปในเรื่องน้ำหนักเบา แข็งแรง อัตราการดูดซึมน้ำต่ำมาก เป็นฉนวนกันความร้อน สามารถก่อสร้างได้สะดวกรวดเร็วทำให้ประหยัดเวลา และค่าแรงงาน แต่ก็ยังมีข้อด้อยในเรื่องราคาที่สูงกว่า

การบ่มคอนกรีต (Concrete curing) เป็นการควบคุมและป้องกันไม่ให้น้ำภายในคอนกรีตระเหยออกเร็วเกินไป เนื่องจากคอนกรีตต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์อย่างสมบูรณ์ที่เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยตรง จึงจำเป็นต้องบ่มคอนกรีตให้มีความชื้นอยู่เสมอ (อย่างน้อย 7 วัน) กำลังรับแรงอัดจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเท่าที่ซึ่งมีความชื้นพอให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยาได้ 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 ไม่เหมาะกับงานที่มีพื้นที่กว้างเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น

2. การบ่มโดยการป้องกันการสูญเสียน้ำของเนื้อคอนกรีต เป็นการปิดผิวของคอนกรีตไม่ให้ความชื้นระเหยออกจากเนื้อคอนกรีต วิธีการบ่มได้แก่

- การบ่มด้วยกระดาษกันน้ำซึม เป็นการปิดผิวคอนกรีตด้วยกระดาษกันน้ำซึมอย่างน้อย 3 วัน นิยมใช้กับงานคอนกรีตแนวระดับ กระดาษต้องมีคุณสมบัติเหนียว ไม่ยืดหดตัวในขณะที่เปียกและแห้งรอยต่อระหว่างแผ่นอาจยึดกันด้วยกาวประเภทยางมะตอย ข้อควรระวังคือบริเวณรอยต่อที่ต้องติดแน่น และกระดาษต้องไม่เกิดการชำรุด ข้อดีคือ สะดวก รวดเร็ว ป้องกันคอนกรีตไม่ให้แห้งเร็ว แต่มีข้อเสียคือราคาแพง ไม่สะดวกในการปฏิบัติงานและการเก็บรักษาเพื่อนำมาใช้ในครั้งถัดไป

- การบ่มโดยใช้แบบหล่อไม้เปียกและแบบหล่อเหล็ก เป็นการปล่อยคอนกรีตไว้ในแบบหล่อให้นานที่สุด สามารถช่วยป้องกันการสูญเสียความชื้นได้ดี เหมาะกับงานเช่นการหล่อเสา คาน ข้อดีคือทำงานได้สะดวก แต่มีข้อเสียคือต้องใช้ไม้เพื่อมาทำแบบหล่อเป็นจำนวนมาก

- การบ่มโดยใช้สารเคมีเคลือบผิวคอนกรีต เหมาะสำหรับงานที่ต้องการใช้งานอย่างเร่งรีบ อาทิเช่น ตึกสูงที่ลำเลียงน้ำหรืออุปกรณ์บ่มขึ้นไปได้ลำบาก การใช้สารเคมีไปคลุมผิวเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำภายในเนื้อคอนกรีต มีความสะดวกและรวดเร็ว แต่มีค่าใช้จ่ายที่สูง ข้อควรทราบคือสารเคมีต้องพ่นในขณะที่ผิวคอนกรีตยังชื้นอยู่และสารเคมีนี้ไม่เหมาะกับการต่อเติมงานคอนกรีตหรืองานฉาบ เพราะจะทำให้การยึดกันระหว่างคอนกรีตต่อเติมกับคอนกรีตเดิมไม่ดี

- การบ่มโดยใช้แผ่นพลาสติก เป็นการใช้แผ่นพลาสติกปิดคลุมคอนกรีตป้องกันการระเหยของน้ำ แผ่นพลาสติกมีน้ำหนักเบา ทำงานง่าย ได้ผลดี ไม่ต้องรดน้ำเพื่อรักษาความชื้น แต่มีข้อเสียในเรื่องความบางของแผ่นพลาสติกที่ชำรุดหรือขาดง่าย น้ำหนักเบาต้องมีสิ่งของที่หนักวางทับ มีราคาสูงถ้าใช้กับงานที่มีความกว้าง

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

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้การบ่มโดยการป้องกันการสูญเสียน้ำของเนื้อคอนกรีต ซึ่งเป็นการบ่มโดยใช้แผ่นพลาสติก เป็นการใช้แผ่นพลาสติก โพลีเอทิลีน (polyethylene, PE) ปิดคลุมคอนกรีตป้องกันการสูญเสียน้ำในการทำปฏิกิริยาของคอนกรีตมวลเบา

## 2.4 มวลรวม (Aggregate)

มวลรวมคือวัสดุที่ใช้ผสมกับซีเมนต์เพสต์เพื่อผลิตเป็นคอนกรีต คอนกรีตทั่วไปมีมวลรวมเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 70 ถึง 80 ของปริมาณคอนกรีต ซึ่งมวลรวมที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ทรายและหิน

ประเภทของมวลรวมแบ่งตามหน่วยน้ำหนักของมวลรวมสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท ดังนี้

1. มวลรวมน้ำหนักเบา (Light Weight Aggregate) ความหนาแน่น 300-1,100 kg/m<sup>3</sup> และความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 2.5 หินที่เกิดจากธรรมชาติ ได้แก่ Diatomite, Pumice, Scoria, Volcanic Cinder, Tuff มีการเผาวัสดุธรรมชาติ จนขยายตัวเนื่องจากก๊าซที่ดันออกมา เช่น การเผาดินเหนียว (clay), ดินดาน (shale), หินชนวน

2. มวลรวมน้ำหนักปกติ (Normal Weight Aggregate) ความหนาแน่น  $1,500 - 1,800 \text{ kg/m}^3$  และความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.5 – 2.8 ได้แก่ หินปูน หินแกรนิต หินทราย ทรายบก ทรายแม่น้ำ ใช้ในการผลิตคอนกรีตสำหรับอาคารคอนกรีตทั่วไป

3. มวลรวมน้ำหนักมาก (Heavy Weight Aggregate) ความหนาแน่น  $2,400 - 3,100 \text{ kg/m}^3$  และความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 4 ขึ้นไป ได้แก่ Barite, Hematite, Magnetite, Limonite ใช้ในการผลิตคอนกรีตสำหรับอาคารป้องกันการแพร่กระจายกัมมันตภาพรังสี เช่น เตปปฏิกรณ์ปรมาณู

ประเภทของมวลรวมแบ่งตามขนาดเม็ดของมวลรวมสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ดังนี้

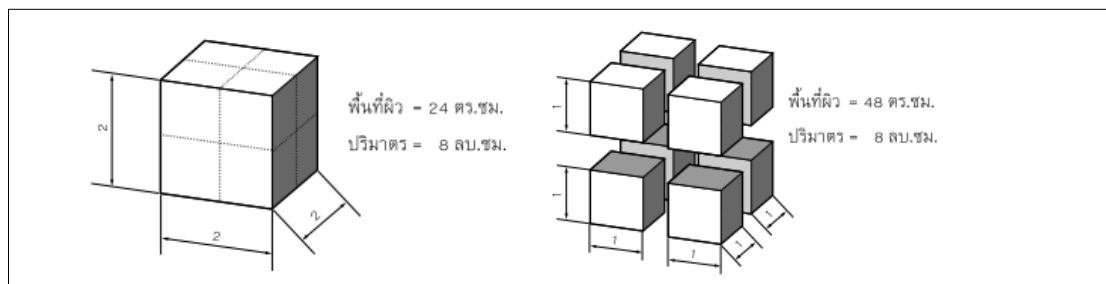
1. มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) คือวัสดุที่ใช้ผสมกับซีเมนต์เพสต์เพื่อผลิตเป็นคอนกรีตที่มีขนาดเม็ดตั้งแต่ 4.75 mm ขึ้นไป มวลรวมหยาบที่นิยมใช้ได้แก่ หิน กรวด

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

การหาขนาดละเอียดของมวลรวม ส่วนใหญ่จะใช้วิธีวิเคราะห์หาส่วนละเอียดตามมาตรฐานอเมริกา (U.S. sieve) เป็นตะแกรงสำหรับคัดขนาดละเอียดของทรายประกอบด้วยเบอร์ 4, 8, 16, 30, 50 และ 100 การวิเคราะห์มวลรวมด้วยตะแกรงมาตรฐานจะสามารถหาค่า โมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) เป็นค่าที่แสดงความละเอียดของมวลรวม ถ้ามีค่าน้อยแสดงว่ามวลรวมมีความละเอียดมาก ซึ่งค่าโมดูลัสของทรายที่ใช้ในงานคอนกรีตที่เป็นมวลรวมละเอียดมีค่าประมาณ 2.20

#### 2.4.1 ขนาดใหญ่สุดของมวลรวม (Maximum Size of Aggregate)

ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้มีผลโดยตรงกับปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ต้องการและขนาดละเอียดของวัสดุผสม กล่าวคือมวลรวมที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิว (Surface Area) โดยรวมน้อยกว่ามวลรวมที่มีขนาดเล็กเมื่อมีน้ำหนักมวลรวมเท่ากันตัวอย่าง สมมุติหินมีรูปร่างเป็นทรงลูกบาศก์ ขนาด  $2 \times 2 \times 2$  เซนติเมตร มีปริมาตร 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร และพื้นที่ผิว  $6 \times 2 \times 2 = 24$  ตารางเซนติเมตรแต่ถ้าหินก้อนนี้ถูกแบ่งออกเป็นทรงลูกบาศก์ 8 ก้อนเท่าๆกันปริมาตรยังเท่าเดิมคือ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตรแต่พื้นที่ผิวจะเพิ่มเป็น  $8 \times 6 \times 1 = 48$  ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 2.1 สมมุติหินมีรูปร่างเป็นทรงลูกบาศก์

ดังนั้นมวลรวมขนาดใหญ่จึงต้องการปริมาณน้ำและปริมาณซีเมนต์ เพื่อเคลือบผิวมวลรวม น้อยกว่าเพื่อให้ความสามารถเท่ากัน หรือถ้าใช้ปริมาณซีเมนต์และค่ายุบตัวเท่ากัน กำลังรับแรงอัด ของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเพราะสามารถลดน้ำหรือลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

ขนาดใหญ่สุดของมวลรวม วัดจากขนาดตะแกรงที่ใหญ่กว่าจากตะแกรงที่มีเปอร์เซ็นต์ของ มวลรวมที่ค้างมากกว่าหรือเท่ากับ 15% ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างการทำ Sieve Analysis ของหิน

ขนาดตะแกรง	น้ำหนักค้าง(กรัม)	เปอร์เซ็นต์ค้าง
1"	9	-
3/4"	1,484	7.2
1/2 "	7,968	38.9
3/8 "	8,745	42.7
No.4	971	4.7
No.8	815	4.0
Pan	508	2.5
รวมน้ำหนัก	20,500	100

ที่มา : ผศ.ดร.เรืองรุชดี ชีระโรจน์,2558

ตะแกรงที่มีเปอร์เซ็นต์ของมวลรวมที่ค้างมากกว่าหรือเท่ากับ 15% คือ ตะแกรงเบอร์ 1/2" ดังนั้นขนาดใหญ่สุดของมวลรวมคือขนาดของตะแกรงเบอร์ใหญ่กว่าถัดไป ดังนั้นขนาดใหญ่สุดตัวอย่าง การทำ Sieve Analysis ของหินนี้คือ 3/4"

มวลรวมขนาดใหญ่ต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่ามวลรวมที่มีขนาดเล็ก เพื่อให้การเทเข้าแบบ หล่อได้(Workability) เท่ากัน เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสโดยรอบน้อยกว่าเมื่อน้ำหนักของมวลรวมเท่ากัน ดังนั้นถ้าให้ปริมาณซีเมนต์และค่ายุบตัว (Slump) เท่ากัน คอนกรีตที่มีส่วนผสมของมวลรวมขนาดใหญ่ ก็ให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่ามวลรวมขนาดเล็ก ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไปมักจะมี ขนาดไม่เกิน 40 มิลลิเมตร

สำหรับกรณีคอนกรีตกำลังอัดสูงการวิบัติของคอนกรีต(Failure) จะเกิดที่มวลรวมแทนที่จะ เกิดที่ซีเมนต์เพสต์เหมือนคอนกรีตกำลังอัดทั่วไป เพราะว่าในมวลรวมขนาดใหญ่นั้นมี โอกาสที่จะมีรอย ร้าวขนาดเล็กอยู่ (Micro cracks) ดังนั้นมวลรวมควรมีขนาดเล็กลงเมื่อใช้ในงานคอนกรีตกำลังอัดสูง

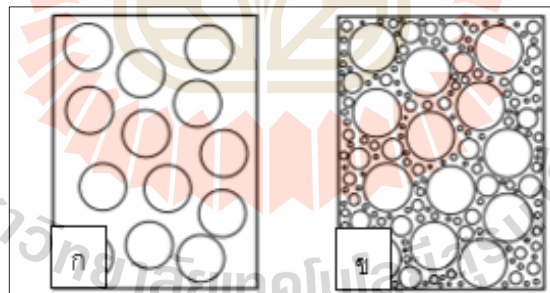
ดังนั้นขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้ในงานคอนกรีตทั่วไปควรมีขนาดไม่เกิน 40 มิลลิเมตร และควรมีขนาดเล็กลงเมื่อใช้ในงานคอนกรีตกำลังอัดสูง

#### 2.4.2 ขนาดคละ (Gradation)

ขนาดคละ คือ การกระจายของขนาดต่างๆ ของอนุภาคมวลรวม ขนาดคละของมวลรวม นับเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการกำหนดปริมาณเนื้อซีเมนต์เพลสที่ต้องการนำมาห่อหุ้มมวลรวม ซึ่งประกอบด้วย มวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด ซึ่งจะต้องมีขนาดใหญ่เล็กคละกันไปคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีขนาดคละดีจะมีส่วนผสมที่เข้ากันสม่ำเสมอ เทเข้าแบบได้ง่ายไม่ออกหินออกทราย ทำให้แน่นได้ง่าย การปาดแต่งผิวหน้า กำล้างอัดและความทนทานยังเป็นไปตามข้อกำหนดมวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่า ตะแกรงเบอร์ 4 ประมาณ 95-100% เราเรียกว่า “ มวลรวมหยาบ ” ซึ่งได้แก่ หิน กรวด เป็นต้นมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 4 ประมาณ 95-100% เราเรียกว่า “ มวลรวมละเอียด ” ซึ่งได้แก่ ทราย หินบดละเอียด เป็นต้น

##### 1. ผลของขนาดคละต่อคุณสมบัติของคอนกรีต คือ

- ปริมาณซีเมนต์เพลส คอนกรีตที่มีขนาดคละของมวลรวมดี มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจะต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสม เมื่อนำมาผสมรวมกันแล้วมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าจะต้องอยู่ในช่องว่างระหว่างมวลรวมที่ใหญ่กว่าให้มากที่สุดดังรูปที่ 2.2 การที่มวลรวมมีขนาดคละที่ดี จะช่วยให้ช่องว่างระหว่างมวลรวมมีขนาดที่น้อยลงส่งผลให้ปริมาณซีเมนต์เพลสที่ใช้เพื่อยึดมวลรวมและอุดช่องว่างระหว่างมวลรวมลดลง ทำให้ลดปริมาณส่วนผสมของปูนซีเมนต์ลงด้วย



รูปที่ 2.2 การเรียงตัวของขนาดคละที่ต่างกัน ก.ขนาดเดียว ข.ขนาดคละต่อเนื่อง

- ความสามารถในการเทได้ (Workability) คอนกรีตที่มีขนาดคละของมวลรวมที่ดี จะมีปริมาณซีเมนต์เพลสที่เหลือจากการเติมช่องว่างระหว่างมวลรวมมากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาดคละเดียว (Single Size) ปริมาณซีเมนต์เพลสดังกล่าวจะทำหน้าที่หล่อลื่นและลดแรงเสียดทานระหว่างมวลรวมทำให้ความสามารถเทได้เพิ่มขึ้น

- การแยกตัว (Segregation) การแยกตัวของคอนกรีตมี 2 ประเภท คือ การแยกตัวของมอร์ต้าออกจากเนื้อคอนกรีตเนื่องจากเขย่ามากเกินไป (Over vibration) และการแยกตัวจากการซึม (Bleeding) โดยลักษณะคือมีการจมลงของมวลรวมเป็นองค์ประกอบที่หนักกว่า ซึ่งจะคั่นน้ำบางส่วนที่

เป็นองค์ประกอบที่เบาที่สุดของส่วนผสม ลอยตัวขึ้นมาบนผิวหน้าคอนกรีต (CPAC Concrete Technology, 2543)

มวลรวมที่มีขนาดละเอียดจะทำให้ช่องว่างเหลือลดลงทำให้ใช้ปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อย คอนกรีตที่มีมวลรวมละเอียดมากเกินไป จะทำให้ความสามารถในการเทได้ (Workability) น้อยลง จึงต้องเพิ่มน้ำและเพสต์ให้มากขึ้นแต่ก็ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต คอนกรีตที่มีมวลรวมหยาบมากเกินไปแม้ว่าความสามารถในการเทได้ (Workability) จะดีแต่ก็อาจก่อให้เกิดปัญหาการแยกตัว (Segregate) ของคอนกรีต มวลรวมที่มีขนาดละเอียดก็จะส่งผลให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้ (Workability) ดี และความแข็งแรง (Strength) ดี

การปรับแก้ส่วนผสมขนาดของมวลรวม (Adjustment of Gradation) กรณีที่มีมวลรวมมีส่วนขนาดละเอียดไม่ได้ตามข้อกำหนด ASTM C 33 จะต้องทำการปรับแก้ด้วยการนำมวลรวมหนึ่งตัวอย่างหรือสองตัวอย่างที่มีส่วนผสมขนาดแตกต่างกัน มาผสมกันในสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้มวลรวมใหม่ที่มีส่วนผสมขนาดตามข้อกำหนด

## 2. การวิเคราะห์ส่วนผสมของวัสดุผสมด้วยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

เพื่อควบคุมตรวจสอบให้ขนาดละเอียดของมวลรวมเป็นไปตามที่กำหนดไว้รวมทั้งใช้เพื่อหาอัตราส่วนผสมของมวลรวมขนาดต่างๆ เพื่อให้ได้ขนาดละเอียดที่เหมาะสม

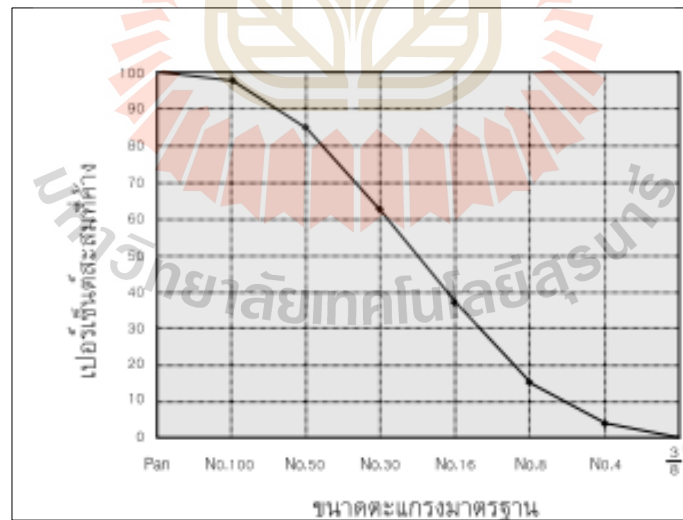
การวิเคราะห์ขนาดละเอียดเริ่มจากการเก็บตัวอย่างมวลรวม มาร่อนผ่านตะแกรงที่วางเรียงตามขนาดช่องว่างของตะแกรง โดยตะแกรงขนาดใหญ่อยู่ข้างบนจนขนาดเล็กสุดอยู่ด้านล่าง และเขย่าชุดตะแกรงเพื่อให้ได้มวลรวมที่ค้างบนตะแกรง จากนั้นนำผลที่ได้ดังกล่าวมาใส่ตารางตามตัวอย่างในตารางที่ 2.5 ซึ่งประกอบด้วย

- น้ำหนักที่ค้าง คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ของวัสดุที่ค้างบนตะแกรงของแต่ละขนาด
- เปอร์เซนต์ที่ค้าง คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ของวัสดุที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด
- เปอร์เซนต์ที่ค้างสะสม คือ ค่าเปอร์เซ็นต์สะสมที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด
- เปอร์เซนต์ที่ผ่านสะสม คือ ค่าเปอร์เซ็นต์สะสมของวัสดุที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด

ตารางที่ 2.5 การวิเคราะห์ขนาดคละ

ขนาดตะแกรง	น้ำหนักที่ค้าง	เปอร์เซ็นต์ที่ค้าง	เปอร์เซ็นต์ที่ค้างสะสม	เปอร์เซ็นต์ที่ผ่านสะสม
No.4	61.52	4	4	96
No.8	169.18	11	15	85
No.16	338.50	22	37	63
No.30	384.50	25	62	38
No.50	353.74	23	85	15
No.100	199.94	13	98	2
Pan	30.76	2	-	-
รวม	1,538.00	100	301	-

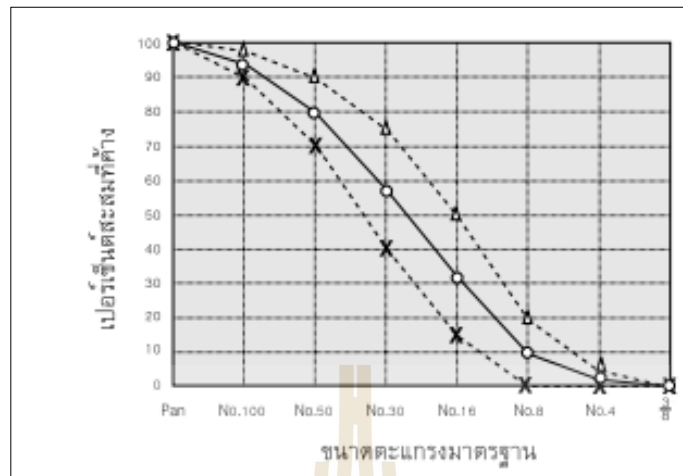
ผลทดสอบที่ได้สามารถนำมาเขียนแผนภูมิขนาดคละของมวลรวมดังรูปที่ 2.3 และคำนวณค่าโมดูลัสความละเอียดต่อไป



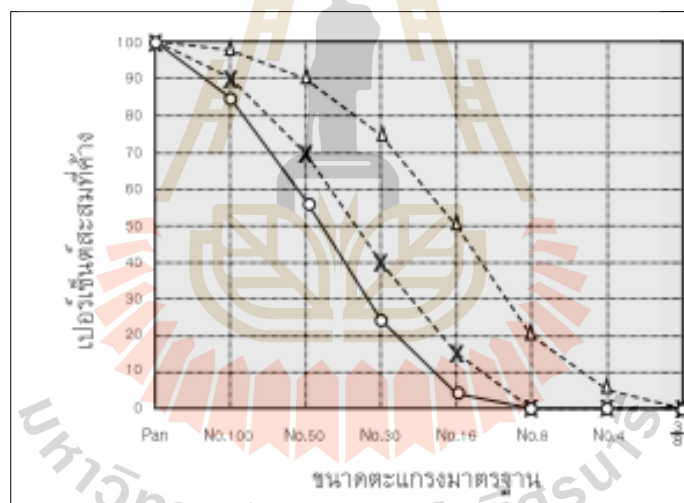
รูปที่ 2.3 แผนภูมิขนาดคละของมวลรวม

แผนภูมิขนาดคละ (Gradation Curves) คือ การนำผลการวิเคราะห์ขนาดคละ มาเขียนแผนภูมิ ซึ่งสามารถช่วยในการเปรียบเทียบขนาดคละของมวลรวมว่าสอดคล้องหรือไม่กับมาตรฐานที่กำหนด





รูปที่ 2.4 ก. ตัวอย่างแผนภูมิขนาดคละของมวลรวมที่มีขนาดคละได้ตามกำหนด



รูปที่ 2.4 ข. ตัวอย่างแผนภูมิขนาดคละของมวลรวมที่มีขนาดคละไม่ได้ตามกำหนด

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเกี่ยวกับขนาดคละ

สำหรับทราย ปริมาณอนุภาคละเอียดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และ 100 มีผลต่อความสามารถเทได้ การแต่งผิวหน้าและการเยิ้มของคอนกรีตสด (Bleeding) นอกจากนี้อนุภาคขนาดเล็กยังช่วยให้คอนกรีตเกาะรวมตัวกันได้ดี ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมของอนุภาคละเอียดคือ ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 อย่างน้อย 15% และเบอร์ 100 อย่างน้อย 5% แต่ต้องไม่ให้มีอนุภาคที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 5% เพราะอนุภาคขนาดเล็กส่วนมากประกอบด้วยดินเหนียว ซึ่งมีผลที่จะต้องใช้น้ำมากขึ้นในการผสมทำให้มีปริมาณของคอนกรีตเกิดการหดตัวสูง

### 2.4.3 ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus)

ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus , F.M.) คือ ตัวเลขดัชนีที่แสดงค่าโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของอนุภาควัสดุในมวลรวม โดยที่

$$F.M. = (1/100) * (\text{ผลบวกของเปอร์เซ็นต์สะสมของมวลรวมที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐาน})$$

$$F.M. = (1/100) * (4+15+37+62+85+98) = 3.01$$

ค่าโมดูลัสความละเอียด เป็นค่าที่ไม่มีหน่วยและเป็นตัวบ่งบอกว่าลักษณะของมวลรวมนั้นหยาบหรือละเอียด ค่าโมดูลัสความละเอียดไม่สามารถใช้บอกขนาดละเอียดของมวลรวมได้ แต่สามารถใช้ควบคุมความสม่ำเสมอของมวลรวมที่ผลิตจากแหล่งเดียวกัน ทราที่มี F.M. สูงคือทราที่มีความหยาบมาก เช่น ทราที่มี F.M. = 3.2 จะมีความหยาบมากกว่าทราที่มี F.M. = 2.3

เนื่องจากทราที่มีความละเอียดมากจำเป็นต้องใช้น้ำมากเพื่อให้ได้ความสามารถเทได้เท่าๆกัน ดังนั้นทราที่เหมาะสมสำหรับผลิตคอนกรีต ควรมีค่าโมดูลัสความละเอียดในช่วง 2.30 - 3.20

นอกจากนี้ ค่าโมดูลัสความละเอียดยังบอกถึงขนาดโดยส่วนใหญ่ของมวลรวมว่าค้ำอยู่บนตะแกรงลำดับที่เท่าใด โดยเริ่มนับจากตะแกรงเบอร์ 100 ตัวอย่างเช่น ค่า F.M. = 3 หมายถึง มวลรวมที่ค้ำบนบนตะแกรงลำดับที่ 3 (เบอร์ 30) นับจากตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 เป็นขนาดเฉลี่ยโดยส่วนใหญ่ของมวลรวมคิดจาก ถาดรอง (Pan) เป็นตะแกรงลำดับที่ 0 ตะแกรงเบอร์ 100 เป็นตะแกรงลำดับที่ 1 ไล่ระดับขึ้นมาจนถึงตะแกรงเบอร์ 4 บนสุดเป็นตะแกรงลำดับที่ 6 ตามลำดับ

ต่อจากนั้นทำการหา F.M. จากค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของขนาดตะแกรงและเปอร์เซ็นต์ที่ค้ำ เช่น  $F.M. = (1/100)[(0 \times 2) + (1 \times 13) + (2 \times 23) + (3 \times 25) + (4 \times 22) + (5 \times 11) + (6 \times 4)] = 3.01$

ค่าโมดูลัสความละเอียดนอกจากใช้บอกถึงความละเอียดของมวลรวมแล้วยังมีประโยชน์ในการนำไปใช้หาอัตราส่วนผสมของมวลรวม (Combined Aggregate) แต่ละชนิดอีกด้วย ซึ่งทำได้โดยการทดลองหาอัตราส่วนผสมของมวลรวมหยาบต่อมวลรวมละเอียด เพื่อให้ได้ขนาดละเอียดของมวลรวมผสมอยู่ในขอบเขตที่กำหนดดังตัวอย่าง

ตัวอย่างการหาอัตราส่วนผสมของมวลรวม (Combined Aggregate) ของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่มีค่า F.M. = 7.30 และ F.M. = 3.01 ตามลำดับ เพื่อให้ได้มวลรวมผสมที่มีขนาดละเอียดอยู่ในขอบเขตตามตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การวิเคราะห์ขนาดคละขนาดคละที่ต้องการ

ขนาดตะแกรง	ค่าเฉลี่ยขนาดคละที่ต้องการ	ขนาดคละที่ต้องการ
$1\frac{1}{2}$ "	2.0	0-4
$\frac{3}{4}$ "	26.0	20.32
$\frac{3}{8}$ "	48.5	43-54
#4	60.0	55-65
#8	69.0	64-74
#16	77.5	73-82
#30	84.5	80-89
#50	95.0	92-98
#100	99.0	98-100
	<b>F.M. = 5.62</b>	

ทดลองเลือกอัตราส่วนผสมเช่น 0.35 สำหรับทราย และ 0.65 สำหรับหินจะได้ F.M. รวม =  $(0.35 \times 3.01) + (0.65 \times 7.30) = 5.79$

เนื่องจาก F.M. ยังไม่ได้ตามต้องการทำการเลือกอัตราส่วนผสมใหม่คือ 0.4 สำหรับทราย และ 0.6 สำหรับหิน

จะได้ F.M.รวม =  $(0.40 \times 3.01) + (0.60 \times 7.30) = 5.59 \sim 5.62$  ถือว่าใช้ได้

ต่อจากนั้นทำการเลือกมวลรวมจากแต่ละตะแกรงตามค่าอัตราส่วนที่ทดลอง คำนวณมวลรวมผสมจะได้ขนาดคละตามต้องการ ต่อจากนั้นนำค่าที่ได้มาเขียนแผนภูมิขนาดคละ

ตารางที่ 2.7 อัตราส่วนผสมมวลรวม

ขนาด ตะแกรง	เปอร์เซ็นต์สะสมที่ค้ำบนตะแกรง						
	ทราย(X)		หิน(Y)		มวลรวมผสม	ค่าเฉลี่ยขนาด ตะแกรงที่ต้องการ	ขนาดตะแกรง ที่ต้องการ
	X	0.4X	Y	0.6Y	0.4X+0.6Y		
1 1/2"	-	-	0	0	0	2.0	0-4
3 4"	-	-	49	29.4	29.4	26.0	20.32
3 8"	-	-	81	48.6	48.6	48.5	43-54
#4	4	1.6	100	60.0	61.6	60.0	55-65
#8	15	6.0	100	60.0	66.6	69.0	64-74
#16	37	14.8	100	60.0	74.8	77.5	73-82
#30	62	24.8	100	60.0	84.8	84.5	80-89
#50	85	34.0	100	60.0	94.0	95.0	92-98
#100	98	39.2	100	60.0	99.2	99.0	98-100
				<b>F.M.=</b>	<b>5.59</b>	<b>5.62</b>	

อัตราส่วนที่คำนวณได้นี้ควรนำไปทดลองผสมจริงในบางครั้งอาจจำเป็นต้องปรับอัตราส่วนผสมอีกตามความเหมาะสม

## 2.5 ส่วนประกอบของคอนกรีตมวลเบา

### 2.5.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกคิดค้นและผลิตโดยชาวอังกฤษชื่อ Joseph Aspdin โดยชื่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีที่มาจากสีของปูนซีเมนต์ที่ได้เหมือนกับสีของหินปูนบนเกาะปอร์ตแลนด์ ทั้งนี้มาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ของไทย คือ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือ มอก.15 เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ ซึ่งทั้งหมดได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

ประเภท 1 (Type 1) : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement)

ประเภท 2 (Type 2) : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement)

ประเภท 3 (Type 3) : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดสูงเร็ว ( High Early Strength Portland Cement)

ประเภท 4 (Type 4) : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement)

ประเภท 5 (Type 5) : ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตสูง (Sulfate Resistance Portland Cement)  
 ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งหรือปูนซีเมนต์ธรรมดา (Ordinary Portland cement ,OPC) เป็นปูนมาตรฐานทั่วไปที่ใช้ในงานโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงสูง อาทิเช่น ถนน อาคารสูง และเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์คอนกรีต เช่น เสา คาน พื้น ฐานราก แต่ไม่ทนทานต่อปฏิกิริยาเคมีโดยเฉพาะซัลเฟต ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน ASTM C150-12 (บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด, 2557)

ซีเมนต์เป็นสารยึดประสานของแข็งให้ติดกัน ซึ่งอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำกับซีเมนต์ที่เรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ที่เกิดขึ้นในขณะที่ผสมปูนซีเมนต์เพื่อใช้งาน ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประกอบด้วยสารประกอบพื้นฐาน 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)

### 2.5.2 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland cement)

น้ำเป็นส่วนผสมที่สำคัญในคอนกรีต เนื่องจากน้ำถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันให้สมบูรณ์ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงคอนกรีต ความสำคัญของน้ำต่อคอนกรีตในด้านอื่นๆ เช่น การบ่มคอนกรีต การทำความสะอาดทั้งมวลรวม และแบบหล่อ เป็นต้น น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตเป็นน้ำประปาที่สะอาด ไม่มีสิ่งแปลกปลอมเจือปน ส่วนใหญ่ไม่ค่อยพบปัญหา เนื่องจากน้ำประปาที่ใช้ส่วนใหญ่มีคุณภาพที่ดี

การเตรียมฟองโฟมสำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ มีการใช้น้ำมาเจือจางสารเพิ่มฟองชนิดโปรตีน (Protein-based foaming agent) ก่อนนำเข้าสู่เครื่องสร้างฟองโฟม น้ำที่ใช้ควรเป็นน้ำที่สะอาดและไม่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ เพราะอาจส่งผลต่อคุณภาพของโฟมได้

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

### 2.5.3 ทราย (sand)

ทรายมีลักษณะอนุภาคเป็นแบบเม็ดกลม ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของหินชั้นเป็นเม็ดย่อย ๆ ละเอียด ทรายที่นิยมนำมาใช้ในงานก่อสร้างมี 2 ชนิดคือ

1) ทรายบก เกิดจากการแตกตัวของหินทรายปะปนอยู่ในดิน ซึ่งในพื้นที่ดินจะมีซากพืช ซากสัตว์ปนอยู่ในดิน ก่อนการใช้งานทรายบกจึงต้องทำความสะอาดแยกสิ่งทีปะปนมาออกไป

2) ทรายแม่น้ำ อยู่ในที่ราบลุ่มของแม่น้ำเป็นตะกอนทรายมากับกระแสน้ำที่พัดนำทรายจากที่ต่าง 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 เช่นงานรากฐาน งานเทพื้น

#### 2.5.4 สารเพิ่มฟอง (Foaming agent)

สารเพิ่มฟองคือสารที่ทำให้เกิดฟองอากาศ โดยใช้หลักการลดแรงตึงผิวของน้ำ และทำให้เกิดฟองเวลาผสมน้ำแต่ฟองอากาศมีขนาดเล็กกว่ามากและมีความคงตัวคือฟองอากาศไม่แตก ขณะทำการผสมคอนกรีตจนกระทั่งคอนกรีตแข็งตัว วัสดุที่ใช้เป็นสารเพิ่มฟองอากาศมีอยู่หลายชนิด ส่วนมากเป็นสารประกอบจำพวกกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic Acid) หรือกรดซัลโฟนิค (Sulfonic Acids) ผสมกับไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) นอกจากนี้อาจเป็นสารจำพวกเกลือเรซิน ของไม้ (Salt of wood resin) ดีเทอร์เจนสังเคราะห์ (Synthetic Detergents) เกลือของซัลโฟเนตลิกนิน (Salts of sulfonated lignin) เกลือของกรดปิโตรเลียม (Salt of petroleum acids) และไขมันบางชนิด เป็นต้น ปริมาณของสารเพิ่มฟองอากาศจะใช้ประมาณร้อยละ 0.005-0.05 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ เนื่องจากใช้ผสมกับน้ำเพื่อลดความเข้มข้นของปริมาณสารและลดแรงตึงผิวของน้ำ (ปริญาญาและชัย, 2556)

สารเพิ่มฟองหรือสารลดแรงตึงผิว (Surfactants) 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 นอกจากนี้

ยังสามารถเพิ่มคุณสมบัติให้ดีขึ้นโดยเติมสารบางชนิด เช่น สารที่ช่วยด้านการสลายตัวของแบคทีเรีย ทำให้เนื้อโฟมมีคุณภาพที่ดีขึ้น

2) สารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ จำแนกตามกลุ่มไฮโดรโฟลิก (สารที่ละลายในน้ำ) ได้ 4 กลุ่มดังนี้

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

- สารลดแรงตึงผิวกลุ่มประจุลบ (Anionic) สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดหรือขัดล้างสกปรก เช่น ผงซักฟอก น้ำยาล้างจาน ชาม เป็นต้น สำหรับความนิยมในการนำสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบไปผลิตโฟมคอนกรีตมีประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์

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

- สารลดแรงตึงผิวกลุ่มสองประจุ (Amphoteric หรือ Zwitterionic) สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้สามารถปล่อยได้ทั้งประจุบวกและประจุลบตามสภาพแวดล้อม ถ้าอยู่ในสภาพแวดล้อมเป็นด่าง จะปล่อยประจุลบ แต่ถ้าเป็นกรดจะปล่อยประจุบวก นิยมนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับผิวหรือผม และไม่ได้ได้รับความนิยมในการนำมาผลิตโฟมคอนกรีต (วิชา ภูจินดา, 2548).

## 2.6 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาของการนำของเสีย(Waste)มาแทนที่มวลรวมในวัสดุการก่อสร้างสามารถพิจารณางานวิจัยที่มีเป็น 3 กลุ่มงานวิจัย คือ 1.กลุ่มงานวิจัยมุมมองด้านเป้าหมายของงานวิจัย โดยพิจารณาจากการวิเคราะห์ขนาด(Size)ของมวลรวม ชนิดของคอนกรีตหรือวัสดุก่อสร้างที่นำไปแทนที่ และวัสดุของเสีย(Material Waste)ที่ใช้เป็นมวลรวม 2.ตัวชี้วัดประสิทธิภาพของงานวิจัยโดยพิจารณาด้านคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties)ที่แตกต่างกัน และ 3.การประเมินประสิทธิภาพของชิ้นทดสอบด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน

สำหรับกลุ่มงานวิจัยมุมมองด้านเป้าหมายของงานวิจัย การพิจารณาขนาดของมวลรวมที่นำมาแทนที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติดังที่จะเห็นได้ในปี 2017 Shahirom Shahidam ได้ทำการพิจารณาขนาดของมวลรวมที่นำไปแทนที่เท่ากับ 10 mm ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ดีที่สุดสำหรับการแทนที่มวลรวมละเอียดแบบ

แห้ง (saturated surface dry ,SSD) ต่อมาในปีเดียวกัน Paulo Roberto Lopes Lima และ M.C.S. Riberiro ได้ทำการวิเคราะห์ขนาดของมวลรวมว่ามีการส่งผลทางด้านคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ถูกแทนที่เนื่องจากขนาด (Size) ที่ลดลงส่งผลต่อคุณสมบัติบางชนิดให้ดีขึ้นแต่ยังส่งผลต่อคุณสมบัติบางชนิดลดลง ในปี 2017 Marinela, Barbuta และ Zainab Z. Ismail ไม่ได้พิจารณาขนาดของมวลรวมที่ใช้ในการแทนที่ในคอนกรีต ซึ่งถือว่าขนาดต่อการผสมมวลรวมให้เป็นวัสดุคอมโพสิตอย่างมาก ในงานวิจัยนี้จึงจะทำการพิจารณาขนาดของมวลรวมที่การวัดจากวิเคราะห์ขนาดละเอียดเพื่อความชัดเจนของขนาดที่จะส่งผลต่อคุณสมบัติการรับแรง ในส่วนของชนิดของคอนกรีตและวัสดุของเสียที่ถูกนำมาใช้ในการทดลองปี 2017 นักวิจัยที่ใช้คอนกรีตซีเมนต์ (Cement Concrete) ในการเป็นวัสดุที่ถูกแทนที่คือ Shahirom Shahidam และ Zainab Z. Ismail เนื่องจากมวลรวมที่นำมาใช้ที่เป็นวัสดุของเสีย (Material Waste) เป็นจำพวกของเสียจากวัสดุก่อสร้าง (Construction waste) ในปีเดียวกันนักวิจัย Marinela Barbuta ใช้ทั้งคอนกรีตซีเมนต์และคอนกรีตพอลิเมอร์ (Polymer Concrete) เพื่อเปรียบเทียบการใช้ของเสียพลาสติก (Plastic Waste) ที่ใช้เป็นมวลรวม ส่วน M.C.S. Riberiro ปี 2017 ใช้คอนกรีตซีเมนต์ผสมคอนกรีตพอลิเมอร์ (concrete-polymer composites) กับของเสียพลาสติก (Plastic Waste) และ Zainab Z. Ismail ปี 2017 ใช้คอนกรีตพอลิเมอร์ (polymer concrete) กับของเสียพลาสติก (Plastic Waste) ชนิดเดียวกัน ในส่วนของงานวิจัยนี้ใช้แบบเดียวกับ Zainab Z. Ismail แต่จะใช้ของเสียพลาสติก (Plastic Waste) ที่เป็นเมลามีนฟอล์มาดีไฮด์ (melamine formaldehyde waste granule; MFG)

ในส่วนของตัวชี้วัดประสิทธิภาพของงานวิจัยโดยพิจารณาคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties) งานวิจัยปี 2017 Shahirom Shahidam, Paulo Roberto Lopes Lima, Marinela Barbuta, M.C.S. Riberiro และ Zainab Z. Ismail ทั้งหมดวิเคราะห์ทางด้านความแข็งแรงกด (Compressive Strength) ซึ่งถือว่าเป็นคุณสมบัติทางกลที่สำคัญของการขึ้นรูปคอนกรีตที่ใช้ในปัจจุบันในส่วนของงานวิจัยที่มีวัตถุประสงค์จะพัฒนางานไปสู่เชิงพาณิชย์และการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่ามาตรฐานการใช้งานคอนกรีต ในขณะที่เดียวกันคุณสมบัติด้าน Density ก็มีความสำคัญที่ต้องควบคู่ไปกับ ด้าน Compressive นักวิจัย Paulo Roberto Lopes Lima, Marinela Barbuta และ Zainab Z. Ismail ได้วิเคราะห์ทางด้าน Density ซึ่งเขาได้กล่าวไว้ว่า ค่า Density ที่มากขึ้นจะทำให้ค่า Compressive Strength มีค่าสูงขึ้นด้วยส่งผลทางด้านความแข็งแรง นักวิจัย Zainab Z. Ismail ได้ทดสอบค่า Density ทั้ง Fresh Density และ Dry Density เพื่อพิสูจน์การวิเคราะห์นี้ นักวิจัย Shahirom Shahidam ปี 2017 ได้วิเคราะห์ค่า Water absorption เพื่อพิจารณาการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่มีวัสดุผสมส่งผลต่อการดูดซึมน้ำที่จะทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาด้านคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties) ด้านความแข็งแรงกด (Compressive Strength) คุณสมบัติด้านความหนาแน่น (Density) และค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

การประเมินประสิทธิภาพของชิ้นทดสอบด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน เพื่อนำมาสู่การวิเคราะห์ข้อมูล ที่ถูกต้องและแม่นยำ ในปี 2017 นักวิจัย Paulo Roberto Lopes Lima และ M.C.S. Riberiro ใช้วิธีการ ANOVA เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ผลการทดสอบชิ้นทดสอบเพื่อหาค่าที่เหมาะสม และนักวิจัย M.C.S.



Riberiro ใช้วิธีการ statistically analyzed เพื่อช่วยในการออกแบบส่วนผสมระหว่างคอนกรีตและวัสดุผสมเพื่อลดการขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบแต่ยังสามารถหาค่าที่เหมาะสมในการทดลองได้ ในเวลาที่น้อยลง นักวิจัย Zainab Z. Ismail ใช้การวิเคราะห์โดย control samples ชนิดของตัวอย่างที่ควบคุมได้สามารถช่วยให้นักวิจัยครอบคลุมผลิตภัณฑ์ในท้องตลาดและเพื่อให้ได้ผลของงานวิจัยที่ดีขึ้น ในส่วนของงานวิจัยนี้ จะใช้วิธีการ Design of Experiment และ statistically analyzed ในการออกแบบส่วนผสมในการขึ้นรูปขึ้นงานเพื่อลดทั้งเวลาและวัสดุในการขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบ

สำหรับงานวิจัย ผลกระทบของอัตราส่วนผสมเศษเมลามีนที่เหมาะสมกับสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา เป้าหมายของงานวิจัยพิจารณาจากการวิเคราะห์ขนาด(Size)ของมวลรวม วัสดุที่นำไปแทนที่คือ เมลามีนฟอสฟอไรต์ไฮดรอกไซด์ ซึ่งการพิจารณาขนาดของมวลรวมที่นำมาแทนที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties)นำมาสู่การพิจารณาการทดสอบด้านคุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties)ด้านความแข็งแรงกด (Compressive Strength) คุณสมบัติด้านความหนาแน่น (Density) และค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) เพื่อวิเคราะห์ผลขึ้นทดสอบ และในการพิจารณาการขึ้นรูปขึ้นงานจะใช้วิธีการ Design of Experiment และ statistically analyzed

แนวทางในการรีไซเคิลเศษเมลามีนในคอนกรีตมวลเบา และดูแนวโน้มความแข็งแรงของคอนกรีตที่ผสมเศษเมลามีนในคอนกรีตมวลเบา

เกียรติสุดา สมณา และ ปริญญา จินดา ประเสริฐ(2015) งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลของอัตราส่วน Ca:Si และ Na:Al ของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ต่อกำลังอัดและลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ที่หล่อด้วยที่มีแคลเซียมสูง มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ที่เหมาะสมและมีคุณสมบัติทางกลที่ดี วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ เถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมออกไซด์สูงและไม่โครซิลิกา ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 15 และ 18 โมลาร์ แทนที่เถ้าถ่านหินด้วยไม่โครซิลิการ้อยละ 0, 5, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก เพื่อให้มีการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วน Ca:Si และ Na:Al ศึกษากำลังอัดที่อายุ 28 วัน และลักษณะ โครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค XRD พบว่าอัตราส่วน Na:Al ควรควบคุมให้มีค่าอยู่ในช่วง 1.41 ถึง 1.78 เพื่อให้สามารถรับค่ากำลังอัดได้ดี การใช้อัตราส่วน Ca:Si ที่ให้ค่ากำลังอัดที่ดีขึ้นอยู่กับร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหินด้วยไม่โครซิลิกาและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ ดังนั้น ปัจจัยร่วมที่ทำให้จีโอโพลิเมอร์รับกำลังได้ดี ได้แก่ ชนิดของวัสดุตั้งต้น ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละการแทนที่ของไม่โครซิลิกาและอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสาน (W/B ratio)

Chalermchai Chaitongat และ Somsak Siwadamrongpong (2018) ได้ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์จากเศษเมลามีนฟอสฟอไรต์ไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตมวลเบา เศษเมลามีนที่ใช้ในการศึกษามี 2 แบบคือ เศษเมลามีนแบบเม็ด (เศษครีป) และเศษเมลามีนแบบฝุ่น จะนำเศษเมลามีนมาแทนที่ทรายในอัตราส่วน 0, 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนัก ที่ความหนาแน่น และ 1,300 kg/m<sup>3</sup> กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และอัตราส่วนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดคงที่ ขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบสำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ

และการนำความร้อน ผลการทดสอบพบว่าเศษเมลามีนสามารถแทนที่ทรายในคอนกรีตมวลเบาได้ ที่การเติมเศษเมลามีนร้อยละ 25 ทำให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด แต่มีการดูดซึมน้ำมากกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ ดังนั้นจึงมีการทดลองเพิ่มเติมโดยการเปลี่ยนความหนาแน่นจาก 1,000 เป็น 1,100 kg/m<sup>3</sup> และเลือกใช้การแทนที่ทรายร้อยละ 25 ผลการทดสอบพบว่ามี การดูดซึมน้ำลดลงและมีสูตรการผสมที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมคือสูตรที่ผสมเศษเมลามีนแบบเม็ด แต่เศษเมลามีนที่เติมเศษฝุ่นมีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าการเติมเศษเม็ด การทดสอบการชะล้างสารละลายของเมลามีนตรวจพบสารหนู (As) เมื่อนำเศษเมลามีนมาเติมในคอนกรีตมวลเบาพบว่าสารหนูที่ถูกชะล้างออกมามีปริมาณน้อยลงเมื่อเทียบกับเศษเมลามีนอย่างเดียว ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้เศษเม็ดเมลามีนแทนที่ทรายบางส่วนสามารถผลิตบล็อกคอนกรีตมวลเบาสำหรับใช้ก่อผนังในงานก่อสร้างได้

Sasiprapa Srichaiyo และ Somsak Siwadamrongpong (2018) ได้ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์จากเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ในคอนกรีตมวลเบา งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนผสมระหว่างเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา และศึกษาการใช้ประโยชน์เศษเมลามีนเป็นมวลรวมละเอียดในคอนกรีตมวลเบา โดยมวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานวิจัยจะประกอบด้วยทรายและเศษเมลามีน ซึ่งเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นในอัตราส่วนเม็ดต่อฝุ่น 50:50, 75:25, 85:15 และ 90:10 จะถูกนำมาแทนที่ทรายร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 0.5 และ 1 ตามลำดับ ควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ 1,100 และ 1,300 kg/m<sup>3</sup> ตัวอย่างคอนกรีตจะถูกนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อน ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดพบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนให้กำลังรับแรงอัดที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ และผลการทดสอบการดูดซึมน้ำพบว่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเศษเมลามีนมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าทราย นอกจากนี้พบว่าอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น 90:10 เป็นสูตรผสมที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดและค่าการดูดซึมน้ำสามารถนำไปใช้งานตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก เลขที่. 2601-2556) ได้ทั้งความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m<sup>3</sup>

แนวทางการศึกษาค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) เศษของเสี้ยนในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงขนาดคละ

Siddique และ Rafat (2002) ได้ทำการศึกษาผลของการทดลองเชิงทดลองเพื่อประเมินสมบัติเชิงกลของคอนกรีตผสมซึ่งมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) คือทรายมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.25 บางส่วนถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยแบบ Class F มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.61 และ มวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วย 5% ,10% ,20% ,30% ,40% และ 50% ของ Class F fly ash โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบสมบัติของคอนกรีตสด Compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength และ modulus of elasticity กำหนดไว้ที่ 7, 14, 28, 56, 91 และ 365 วันผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของคอนกรีตโดยการรวมเถ้าลอยเป็นส่วนทดแทนของมวลรวมละเอียด

กำลังรับแรงอัดสูงสุดเกิดขึ้นกับ 50% fly ash ทุกอายุผลการทดสอบเป็น 40.0 MPa ที่ 28 วัน 51.4 MPa ที่ 91 วัน และ 54.8 MPa ที่ 365 วัน และ ผลการตรวจสอบนี้ชี้ให้เห็น Class F fly ash สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในโครงสร้างคอนกรีต

Choi, Yun-Wang และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษา โครงสร้างจุลภาคพื้นผิว (surface microstructure) ของมวลรวมน้ำหนักเบาขวดพลาสติกของเสีย (Waste Polyethylene Terephthalate Bottles Lightweight Aggregate :WPLA) มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 4.11 และใช้ทรายที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.9 เพื่อตรวจสอบผลกระทบของตะกรันเตาหลอมระเบิด (Granulated Blast-Furnace Slag :GBFS) ต่อ WPLA WPLA ทำจากขวดของเสีย PET และ GBFS ทำการทดลองเกี่ยวกับ compressive strength ,splitting tensile strength ,modulus of elasticity ,slump และ density ของคอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบาขวดพลาสติกของเสีย (Waste PET Bottles Lightweight Aggregate Concrete :WPLAC) ที่อายุ 28 วัน กำลังรับแรงอัดของ WPLAC ที่มีอัตราส่วนการแทนที่ 75% ลดลงประมาณ 33% เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ในอัตราส่วนน้ำ - ปูนซีเมนต์ 45% ความหนาแน่นของ WPLAC แตกต่างกันไปในช่วง 1,940 ถึง 2,260 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยอิทธิพลของ WPLA ประสิทธิภาพของโครงสร้าง ของ WPLAC ลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เพิ่มขึ้น ความสามารถในการเทเข้าแบบหล่อของคอนกรีตที่มี WPLA 75% เพิ่มขึ้นประมาณ 123% เมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติในอัตราส่วนน้ำ - ปูนซีเมนต์ 53% การยึดเกาะกันของ GBFS สามารถเสริมสร้างพื้นผิว (strengthen the surface) ของ WPLA และลดขอบเขตการเปลี่ยนผ่าน (narrow the transition zone owing) ได้เนื่องจากปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide) ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) และความหนาแน่นรวม (bulk density) ของ WPLA อยู่ที่ประมาณ 50% ต่ำกว่ามวลรวมตามธรรมชาติและค่าดูดซึมน้ำไม่ส่งผลต่อ WPLA ที่ได้มาจากขวด PET ที่เป็นของเสีย และ GBFS บนพื้นผิวของมวลรวมที่อายุบ่ม 28 วัน กำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของ WPLAC ลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพโครงสร้างของ WPLAC ที่มีอัตราส่วนการเปลี่ยนการแทนที่ 75% ลดลงประมาณ 21% เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอิทธิพลของน้ำหนัก WPLA และความแข็งแรงของเมทริกซ์ (matrix strength) การเทเข้าแบบหล่อของ WPLAC ได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้นเมื่ออัตราส่วนทดแทนและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้นผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงการเทเข้าแบบหล่อของ WPLAC สามารถลดปริมาณน้ำแบบหน่วยและปริมาณสารลดน้ำได้ การเปลี่ยนผ่าน (The transition zone) ระหว่าง WPLA และซีเมนต์เฟลสได้รับการขยายตัวเมื่อเทียบกับของมวลรวมตามธรรมชาติกล่าวคือการยึดเกาะของ GBFS กับพื้นผิวของ WPLA มีความสามารถในการเสริมสร้างพื้นผิว (capable of strengthening) ของมวลรวม และ โชนการเปลี่ยนแปลง (narrowing the transition zone) เมื่อเทียบกับพื้นผิวของมวลรวมน้ำหนักเบาอื่น ๆ ที่ไม่มี GBFS เนื่องจากปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide)

Senthamarai, R. M. และ P. Devadas Manoharan (2005) ได้ทำการศึกษาของเสียจากอุตสาหกรรมเซรามิก (ceramic industrial wastes) มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.88 ที่เหมาะสมสำหรับการบดผสม

หินหยาบแบบธรรมดา (crushed stone coarse aggregate) ทำการทดลองเพื่อหา the compressive ,splitting tensile ,flexural strengths และ the modulus of elasticity ของคอนกรีตที่มีเศษมวลรวมหยาบเซรามิกกับการเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลรวมหยาบหิน สมบัติของมวลรวมถูกเปรียบเทียบกับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเทเข้าแบบหล่อได้ (Workability) ของคอนกรีต มวลรวมหยาบของเสียที่ดีและลักษณะความแข็งแรงเทียบเท่ากับของคอนกรีตทั่วไป ของเสียจากอุตสาหกรรมเซรามิกเปลี่ยนเป็นมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) คุณสมบัติของมวลรวมหยาบของเสียจากอุตสาหกรรมเซรามิก อยู่ในช่วงของค่าการผลิตคอนกรีตมวลรวม The compressive ,splitting tensile และ flexural strengths ของคอนกรีตมวลรวมหยาบของเสียจากอุตสาหกรรมเซรามิกคือ 3.8, 18.2 และ 6% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป แต่คอนกรีตมวลรวมหยาบของเสียจากอุตสาหกรรมเซรามิกมีอัตราส่วนแรงดึงต่อแรงกดต่ำ (tensile to compressive strength ratio) คุณสมบัติคอนกรีตมวลรวมหยาบของเสียจากอุตสาหกรรมเซรามิก ไม่แตกต่างจากคอนกรีตทั่วไป งานวิจัยนี้เป็นพื้นฐานสำหรับการทดลองต่อไปเกี่ยวกับคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) โดยใช้คอนกรีตมวลรวมหยาบของเสียจากอุตสาหกรรมเซรามิก (Ceramic Waste Coarse Aggregate Concrete)

Ismail, Zainab Z. และ Enas A. Al-Hashmi (2009) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่มีเนื้อมวลรวมละเอียดเป็นของเสียแก้ว ( Waste Glass) มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.36 และทรายที่ใช้มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.37 ทดสอบคุณสมบัติความแข็งแรง (strength) และ ASR expansion ถูกนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของเสียแก้ว ปริมาณของเสียแก้วที่บดได้ทั้งหมด 80 กิโลกรัมถูกใช้แทนทรายบางส่วนที่ 10%, 15% และ 20% กับคอนกรีตผสม 900 กิโลกรัม ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึง pozzolanic strength 80% ที่ได้รับจากของเสียแก้วหลังจากผ่านไป 28 วัน Flexural strength และ Compressive Strength ของชิ้นทดสอบที่ 20% ของเสียแก้ว มีค่า 10.99% และ 4.23% ตามลำดับสูงกว่าชิ้นทดสอบควบคุมที่ 28 วัน The mortar bar tests แสดงให้เห็นว่าเศษแก้วที่บดละเอียดช่วยลดการขยายตัวได้ถึง 66% เมื่อเทียบกับชิ้นทดสอบควบคุมค่าการยุบตัว (slump) ของชิ้นทดสอบคอนกรีตของเสียแก้วลดลงเมื่อปริมาณของเสียแก้วเพิ่มขึ้นซึ่งได้รับผลกระทบจากรูปร่างของเม็ดพลาสติกของเสียแก้ว (waste glass grain shapes) แม้ว่าการยุบตัวของส่วนผสมเหล่านี้จะลดลง แต่ก็มี การเทเข้าแบบหล่อได้ดี The pozzolanic effect ของของเสียแก้วในคอนกรีตเป็นที่ชัดเจนมากขึ้นเมื่ออายุ 28 วันขึ้นไป ร้อยละสูงสุดของของเสียแก้วให้ค่าสูงสุดของ กำลังรับแรงอัดและ flexural Strengths คือ 20% การใช้ของเสียแก้วในการแทนที่บางส่วนสำหรับมวลรวมละเอียดไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ในสีคอนกรีต ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าการแทนที่ทรายบางส่วนด้วยผงของเสียแก้ว ช่วยลด ASR expansion การใช้ของเสียแก้วที่เป็นชิ้นส่วนเล็กๆ ในมวลรวมละเอียดสามารถให้ผลลัพธ์ที่มีแนวโน้มเป็นไปได้

Albano, C.และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตที่มี Polyethylene Thatphtalate (PET) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (0.50 และ 0.60) แตกต่างกันปริมาณ PET (10 และ 20 vol%) และอุณหภูมิขนาด ศึกษาอิทธิพลของความร้อนที่ย่อยสลายของ PET ในคอนกรีต เมื่อผสมเข้ากับอุณหภูมิ

ที่ต่างกัน (200, 400, 600 C) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่เติม PET เมื่อสัดส่วนปริมาตรและขนาดอนุภาคของ PET เพิ่มขึ้นพบว่าการลดลงของ compressive strength ,splitting tensile strength ,modulus of elasticity และ ultrasonic pulse velocity อย่างไรก็ตามการที่ผลที่ได้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นนอกจากนี้พลังงานการกระตุ้น (the activation energy) ยังได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิ ตำแหน่งอนุภาคของ PET บนแผ่นและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์การผสมคอนกรีตที่เติมด้วย PET แสดงให้เห็นว่าถึงการลดลงของ compressive strength ,splitting tensile strength และ modulus of elasticity ในส่วนอื่นๆการรวมของ PET ก่อให้เกิดข้อบกพร่องในโครงสร้างภายในของคอนกรีตทำให้การลดความแข็งแรงและลดความตึง (stiffness) พฤติกรรมนี้สามารถทำให้เกิดผลดี เมื่อบางความยืดหยุ่นของวัสดุเป็นสิ่งที่ต้องการ โดยเฉพาะที่เนื้อของ PET ที่ 10% สำหรับทั้งอัตราส่วน w / c ผสมกับ 10% ของ PET ขนาดเล็กหรือ 50/50 ขนาดของอนุภาคผสมมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการผสมที่มีปริมาณมากขึ้นหรือขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่านอกจากนี้การผสมผสานกับ PET (ขนาดอนุภาคขนาดใหญ่) 20% สำหรับทั้ง w / c มีกำลังรับแรงอัดต่ำ อนุภาค PET ดังกล่าวขนาดและเนื้อไม่สามารถที่จะบดอัดเนื่องจากการเทเข้าแบบหล่อต่ำ การผสมผสานเพิ่มช่องหรือรู (cavities or pores) ในคอนกรีต ดังนั้นทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงอย่างมาก The flexural strength ของคอนกรีต PET เมื่อสัมผัสกับแหล่งความร้อนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างมาก ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัด ในขณะที่ 400 และ 600 องศาเซลเซียสกระบวนการย่อยสลายของ PET จะช่วยให้เกิดการสะสมของแก๊สที่เกิดจากหลุมในแผ่นคอนกรีตผสมจึงทำให้กำลังรับแรงอัดลด นอกจากนี้ค่าพลังงานกระตุ้นจะสูงกว่าจุดศูนย์กลางของแผ่นคอนกรีตมากกว่าพื้นผิวเนื่องจากคอนกรีตเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดีนอกจากนี้พลังงานนี้จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสัมผัสอุณหภูมิภายนอกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า  $w / c = 0.6$  ซึ่งการปรากฏเป็นน้ำส่วนเกินทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ hydrolytic degradation ของ PET และร้อยละการดูดซึมน้ำในคอนกรีตผสม PET จะเพิ่มขึ้นตามค่า w / c อัตราส่วนเนื้อของมวลรวมและขนาดอนุภาคของ PET เนื่องจากจะเพิ่มความพรุนของการผสมผสานจากการเทเข้าแบบหล่อที่ต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม the ultrasonic pulse velocity ลดลงเนื่องจากความพรุนที่สูงขึ้นช่วยลดการแพร่กระจายของคลื่นอัลตราโซนิกจากข้อสรุปทั่วไปกล่าวว่าการลดของน้ำหนักของคอนกรีตและการป้องกันสิ่งแวดล้อมโดยการรีไซเคิลของเสีย แม้ว่าเม็ดพลาสติก PET จะลดคุณสมบัติทางกล แต่สามารถใช้สำหรับการห่อหุ้มวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมอื่น ๆ และผลิตคอนกรีตที่มีความปลอดภัยต่อระบบนิเวศรวมทั้งฐานสำหรับทางหลวงทางเท้า, ทางหลวงและ โครงสร้างการขนส่งอื่น ๆ ที่มีความแข็งแรงสูงไม่จำเป็นมากนักสามารถใช้คอนกรีตผสม PET ได้ นอกจากนี้เนื่องจากการเพิ่มการดูดซึมน้ำของคอนกรีตผสม PET อาจเป็นไปได้ที่จะใช้ในสนามกีฬาและทางเท้าที่ต้องการน้ำ

Ammari, Madiha ZJ และ Richard Fowler (2017) การศึกษาเชิงทดลองนี้เป็นการปรับเปลี่ยนการศึกษาก่อนหน้านี้เพื่อตรวจสอบการแบ่งเกรดของหินบดละเอียดเพื่อใช้ในคอนกรีตผสมเสร็จ สำหรับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่แข็งตัวได้เตรียมขึ้นทดสอบคอนกรีตจำนวน 45 ก้อน การทดสอบ 5 แบบ

คือ 2.4, 2.6, 2.75, 2.92 และ 3 ชั้นทดสอบทั้งหมดถูกทิ้งไว้ในการบ่มจนถึงการทดสอบที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ตัวอย่างถูกรับโหลดแบบทำลายและค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดถูกนำมาใช้เพื่อการเปรียบเทียบในการวัดการเทเข้าแบบหล่อของคอนกรีตผสมสดการทดสอบตารางการไหล (flow table test) ได้ถูกนำมาใช้โดยตรงหลังจากทำการผสมและมีการบันทึกค่าเฉลี่ยของการกระจายคอนกรีตสูงสุดที่ขนานกับขอบทั้งสองของตาราง ผลการทดลองยืนยันว่าค่าความละเอียดที่เหมาะสมสำหรับหินบดที่จะใช้เป็นส่วนผสมที่ดีในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อให้ได้กำลังอัดสูงสุดคือ 2.78 การทดสอบตารางการไหลพบว่าการเพิ่มขึ้นของการเทเข้าแบบหล่อของคอนกรีตสดที่มีค่าความละเอียดสูงขึ้นของหินบดละเอียดที่ใช้ในการผสมคอนกรีต การเทเข้าแบบหล่อของโมดูลัสความละเอียดที่เหมาะสมที่สุด 2.78 จะประมาณ 415 มิลลิเมตรซึ่งเป็นค่าผสมที่มีการเทเข้าแบบหล่อในการใช้งานได้ดีมาก หินบดละเอียดทุกเกรดที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ได้รับการตรวจสอบเพื่อให้ตรงกับความต้องการของ ASTM สำหรับมวลรวมละเอียดค่าโมดูลัสความละเอียดที่เหมาะสมที่สุดของหินปูนเพื่อใช้เป็นส่วนผสมที่ดีในส่วนผสมคอนกรีตพบว่ามีค่าเท่ากับ 2.78 และมีขนาดกะ (grading) ที่แนะนำในผลการวิจัยตาราง ในการคำนวณการเทเข้าแบบหล่อสำหรับการจัดระดับขนาดกะหินปูนที่แนะนำคือ 412 มิลลิเมตร ซึ่งถือได้ว่าเป็นส่วนผสมที่สามารถทำงานได้ ควรมีการตรวจสอบขนาดกะของมวลรวมละเอียด ที่มีการปรับและเปรียบเทียบกับ ASTM Grading ขนาดกะหินปูนที่แนะนำมีค่าความละเอียดที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 2.78 ตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM ที่ระบุไว้ในผลการวิจัยข้างต้น

Kumar, D. Pavan และ C. Sashidhar (2018) ได้ทำการศึกษา Self-compacting concrete (SCC) ถือเป็นวัสดุก่อสร้างที่เป็นนวัตกรรมใหม่ในอุตสาหกรรมก่อสร้างเนื่องจากคุณสมบัติสดและแข็ง เนื่องจากการลดปริมาณทรายและปัญหาสิ่งแวดล้อมจึงทำให้ทรายที่ผลิต (manufactured sand :MSand) ใช้เป็นมวลรวมละเอียดแทนทราย การรักษามุมมองของคุณภาพที่ต้องการของขนาดกะของมวลรวมละเอียดเพื่อตรวจสอบผลกระทบของค่าความแปรผันที่แตกต่างกันของ โมดูลัสความละเอียด (fineness modulus :FM) ของ MSand ที่มีค่าเท่ากับ 2.3, 2.5, 2.7, 2.9 และ 3.1 ต่อคุณสมบัติสดของ SCC วิธีการทดสอบที่ดำเนินการคือ slump flow ,T50cm ,V-funnel และ L-box ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่า SCC ที่มีค่า FM เท่ากับ 2.7 ให้ผลดีกว่าค่า FM อื่น ๆ สังเกตได้ว่าค่า FM จาก 2.3 ถึง 2.7 ค่าการเพิ่มขึ้นของ FM ทำให้ SCC มีคุณสมบัติสดเพิ่มขึ้นเนื่องจากขนาดชิ้นส่วนเล็กๆ (finer fraction) ที่ลดลง ค่า FM 2.7 ถึง 3.1 ที่เพิ่มขึ้นทำให้คุณสมบัติสดของ SCC ลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของเศษส่วนที่หยาบกร้าน (coarser fraction) ดังนั้นมันจึงพบว่าขนาดกะของชิ้นส่วนละเอียดและหยาบ (gradation of finer and coarser fractions) ของ MSand จะต้องได้รับการพิจารณาเพื่อให้ได้คุณสมบัติสดที่เพียงพอของ SCC สามส่วนผสม SCC\_FM2.5 ,SCC\_FM2.7 และ SCC\_FM2.9 ถูกจัดว่าเป็นส่วนผสมของ SCC ที่ประสบความสำเร็จตามเกณฑ์การยอมรับของ SCC จากการผสมทั้ง 3 สูตรนี้ประสิทธิภาพของ SCC\_FM2.7 มีมากกว่าที่ควรอีก 2 สูตรคือ SCC\_FM2.5 และ SCC\_FM2.9 จากผลการสังเกตเห็นได้ชัดว่าตั้งแต่ 2.3 ถึง 2.7 ค่า FM ค่า FM ที่เพิ่มขึ้นเพิ่มคุณสมบัติสด SCC เนื่องจากมีเศษที่ละเอียดลดลง จากข้อสังเกตจากค่า 2.7 ถึง 3.1 ค่า FM ที่

เพิ่มขึ้นทำให้คุณสมบัติสด SCC เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีเศษที่หยาบขึ้นด้วยเหตุนี้จึงควรจะมีการเก็บองค์ประกอบที่ละเอียดและหยาบขึ้นของ MSand ไว้เพื่อให้ได้คุณสมบัติสดของ SCC

## 2.7 สรุป

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมารีไซเคิลของเสียโดยผสมกับปูนซีเมนต์ พบว่ามีการนำของเสียต่างๆมาแทนที่ทรายเป็นมวลรวมผสมในคอนกรีตมีการศึกษาวิจัยจำนวนมาก งานวิจัยที่ศึกษาการนำพลาสติกมาผสมในคอนกรีต ผลการทดลองส่วนใหญ่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่ม แนวทางในการดำเนินงานวิจัยคือ เป็นแนวทางในการรีไซเคิลเศษพลาสติก และดูแนวโน้มความแข็งแรงของคอนกรีตที่ผสมเศษพลาสติก แนวทางในการรีไซเคิลเศษของเสียเมลามีนในคอนกรีตมวลเบา และดูแนวโน้มความแข็งแรงของคอนกรีตที่ผสมเศษของเสียเมลามีนในคอนกรีตมวลเบา พบว่าในงานวิจัยของ Chalermchai Chaitongat (2018) สามารถนำเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์มาใช้เป็นมวลรวมในการแทนที่ทรายในคอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นและให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่การแทนที่ทรายร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และในงานวิจัยของ Sasiprapa Srichaiyo (2018) ศึกษาอัตราส่วนระหว่างเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเศษเมลามีนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม แต่ยังมีปัญหาด้านคุณสมบัติการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นตามความแข็งแรงด้วย และสุดท้ายแนวทางการศึกษาค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) เศษของเสียในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงขนาดกะจะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) ที่ค่าสูงหรือต่ำเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติคอนกรีต การปรับปรุงขนาดกะของมวลรวมของของเสียมีส่วนสำคัญ

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

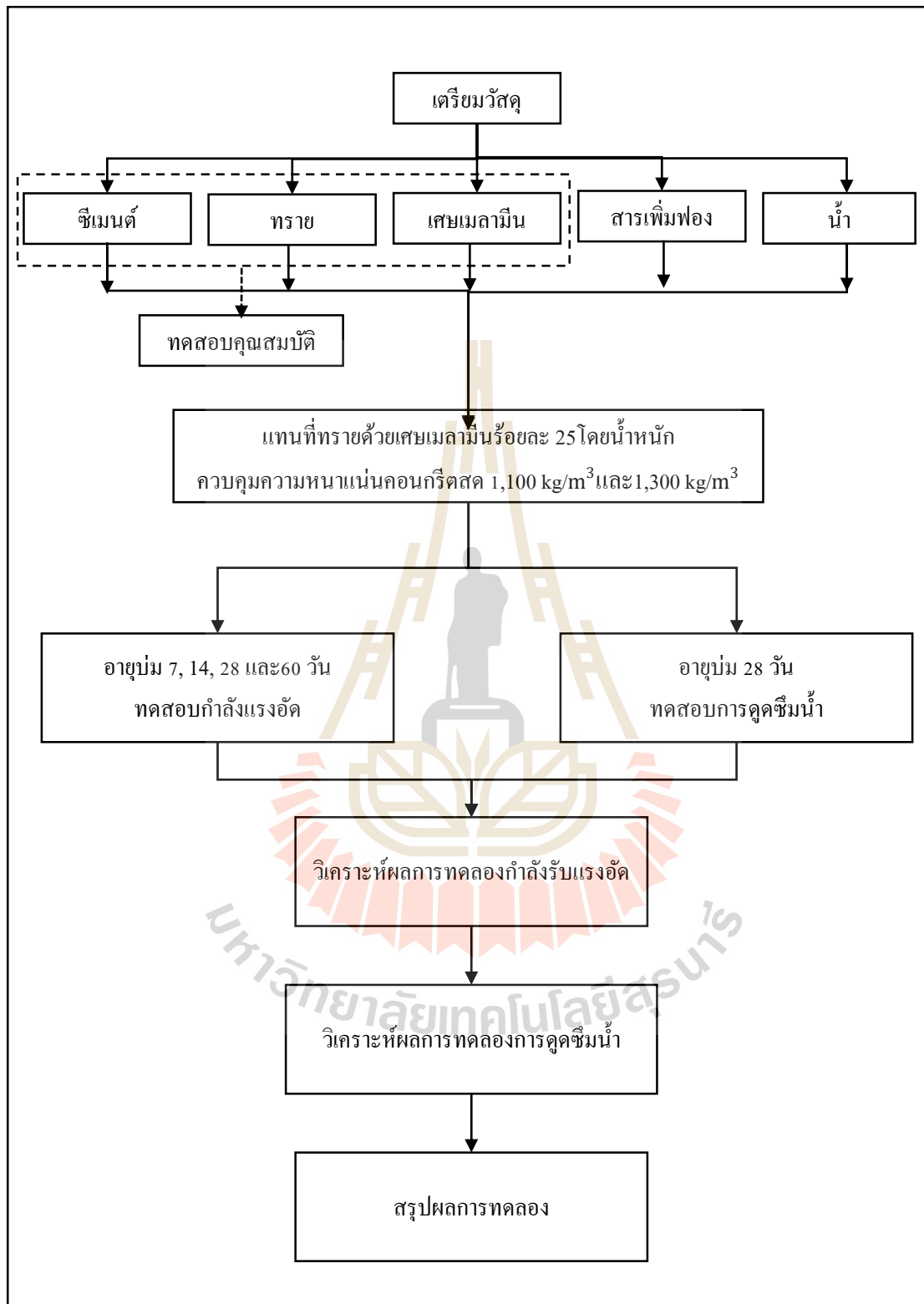
#### 3.1 บทนำ

พลาสติกเทอร์โมเซตติงเช่นเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ นิยมใช้ในการผลิตเครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน ทั้งนี้การกำจัดเศษของเสียเมลามีนทำให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการใช้ประโยชน์เศษของเสียเมลามีนเป็นมวลรวมละเอียดในคอนกรีตมวลเบา เศษของเสียเมลามีนดังกล่าวถูกนำไปแทนที่ทรายร้อยละ 25

ในบทนี้อธิบายถึงรายละเอียดวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยแนวทางในการศึกษาดังแผนการดำเนินงานวิจัยแสดงในรูปที่ 3.1







รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

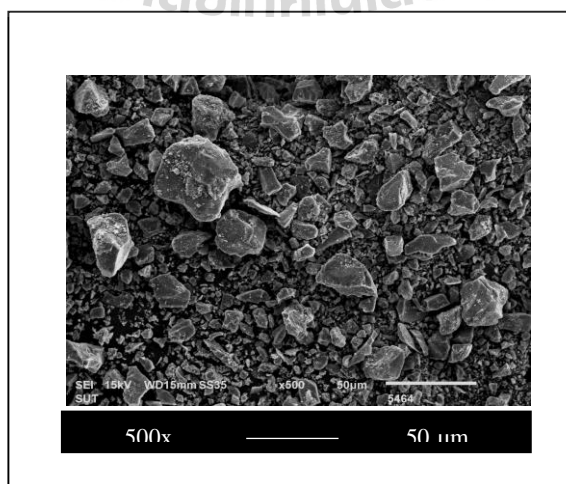
## 3.2 วัสดุ (Materials)

### 3.2.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland cement type 1 หรือ OPC) ตามมาตรฐาน ASTM C150-12 ในการผลิตคอนกรีตมวลเบา เนื่องจากปูนประเภท 1 มีความคุ้มค่าต่อราคาสูงสุด สามารถผลิตคอนกรีตมวลเบาให้ได้กำลังตามมาตรฐานโดยใช้ปูนซีเมนต์ไม่มากเกินไป และที่สำคัญคือสะดวก สามารถหาซื้อได้ทั่วไป การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 จะได้ให้คอนกรีตมวลเบาที่มีความแข็งแรง ทนการกัดกร่อนของน้ำได้ดี งานวิจัยเลือกใช้ปูนซีเมนต์ของปูนงานโครงสร้าง เทเสาคานเอสซีจี สูตรไฮบริด (ปูนซีเมนต์ถุง 50 กิโลกรัม) (รูปที่ 3.2) มีลักษณะเป็นผงสีเทา รูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม และมีพื้นผิวค่อนข้างขรุขระดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เอสซีจี ไฮบริด



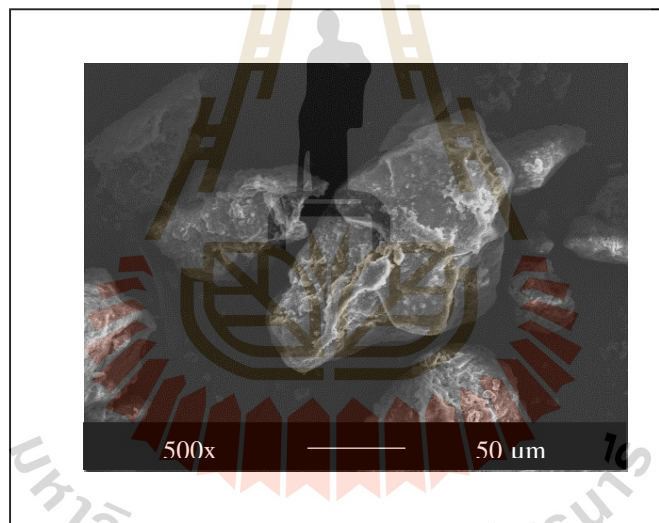
รูปที่ 3.3 ภาพขยายของปูนซีเมนต์ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า (สคิประภา ,2559)

### 3.2.2 น้ำ

น้ำเป็นส่วนผสมที่สำคัญในการผสมส่วนผสมให้เข้ากัน น้ำที่ใช้ในการผสมควรเป็นน้ำประปาสะอาด ไม่มีสารปนเปื้อนที่อาจเป็นอันตรายต่อคอนกรีต น้ำประปาสะอาดที่ใช้ในงานวิจัยมีค่า PH ในช่วง 7.5-8 (Sasiprapa Srichaiyo และ Somsak Siwadamrongpong (2018))

### 3.2.3 ทราย

ทรายเป็นส่วนผสมหลักในงานคอนกรีตที่จัดเป็นมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 สำหรับทรายที่ใช้ในงานวิจัยคือทรายแม่น้ำ(River sand)ที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงร่อนเบอร์ 16 ที่มีค่าโมดูลัสความละเอียด(Fineness Modulus, FM) เท่ากับ 2.67 ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.52 และการดูดซึมน้ำ 0.33 จากภาพขยายของทรายด้วย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่า ทรายมีรูปร่างเป็นก้อนค่อนข้างมน และมีผิวขรุขระเล็กน้อย



รูปที่ 3.4 ภาพขยายของทรายด้วย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า

### 3.2.4 เศษของเสียมเมลามีน

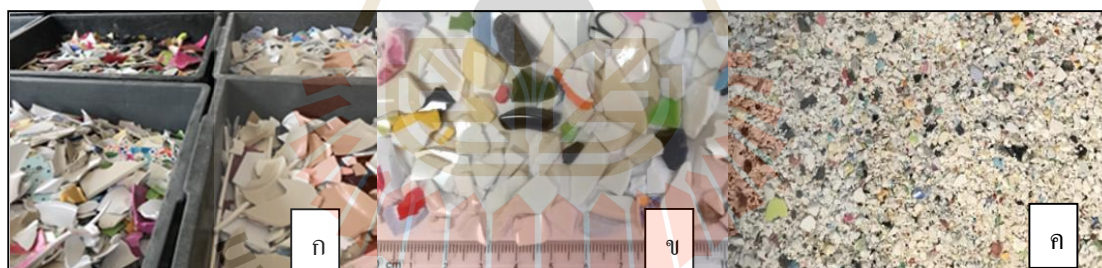
สมบัติทั่วไปของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์พลาสติกคือมีเนื้อแข็งมากทนทานต่อการขีดข่วนเหนียวไม่แตกง่ายผสมสีได้ดีทนทานต่อน้ำยาฟอกสีผงซักฟอกน้ำมัน ไม่ติดไฟไม่อ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนแต่เมื่อถูกความร้อนสูงจะไหมเกรียมเป็นจนวนไฟฟ้าไม่ดูดความชื้นผลิตภัณฑ์ที่สำคัญที่ทำจากเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ ได้แก่ จาน ชาม ถ้วยกาแฟ เครื่องใช้ภายในครัว สวิตซ์ไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้า เป็นต้น โดยสมบัติทางกลและทางกายภาพของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงลักษณะทางกายภาพของเมลามีน

ลักษณะคุณสมบัติ	คุณสมบัติ
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	1.48
ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength), MPa	60
การยืดตัวแรงดึง (Tensile elongation), %	0.79
ความทนแรงกระแทก (Notched izod impact), J/m	16.0
ความต้านทานอุณหภูมิ (Temperature resistance), °C	300
การดูดซึมน้ำ (Water absorption), %	5.6

ที่มา : สมบัติทางกลและทางกายภาพของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ สุธน เติษยานนท์, 2551

เศษเมลามีนที่ใช้ในงานวิจัยได้รับจาก บริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน) ผู้ผลิตเครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร (Tableware product) ที่ไม่ผ่านมาตรฐาน (Quality control) และเมื่อบดจะได้รูปร่างดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เศษของเสียเมลามีน

สำหรับเศษของเสียเมลามีนที่ใช้ในงานวิจัยเริ่มจากได้ผลิตภัณฑ์ (Tableware product) ที่ไม่ผ่านมาตรฐาน (Quality control) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เศษของเสียเมลามีน (ก) นำผลิตภัณฑ์ไปบดทำลายโดยเครื่องบดทำลายของโรงงาน ได้เป็นเศษเมลามีนรูปที่ 3.5 เศษของเสียเมลามีน (ข) หลังจากนั้นผู้วิจัยนำมาบดผ่านเครื่องบดผงละเอียด (Recycling machinery) รุ่น N17 ที่ตะแกรงเครื่องบดเบอร์ 8 ได้เศษของเสียเมลามีน (Melamine Waste Defect) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เศษของเสียเมลามีน (ค) ที่มีค่าค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, FM) เท่ากับ 2.17 ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, FM) ของเศษของเสียเมลามีน (Melamine Waste) ผ่านเครื่องบดผงละเอียด

SIEVE NO.	SIEVE OPENING (mm.)	WT. SIEVE (gm.)	WT.SIEVE +SAMPLE LE (gm.)	WT. SAMPLE RETAINED (gm.)	PERCENT RETAINED	CUMULATIVE PERCENT RETAINED	PERCENT FINER
4	4.75	505	505	0	0.00	0.00	100.00
8	2.36	483.4	495.3	0	0.00	0.00	100.00
16	1.18	407.7	595.3	20.27	4.05	4.05	95.95
30	0.6	385.9	415.4	224.48	44.90	48.95	51.05
50	0.3	545.7	553.8	133.83	26.77	75.72	24.28
100	0.15	341.6	348	61.42	12.28	88.00	12.00
pan		488.7	660.1	56.47	11.29	99	1
sum				496.47	99.29	216.72	
						FM 2.17	

เศษของเสียเมลามีนหลังจากผ่านเครื่องโม่บดผงละเอียด จะถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis, ASTM C33) เพื่อคัดแยกโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) เท่ากับ FM1.25 ,FM1.00 ,FM0.75 และ FM0.50 ตารางที่ 3.3-ตารางที่ 3.6 เพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดก่อนนำไปผสมในคอนกรีตมวลเบา

ตารางที่ 3.3 ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) ของเศษของเสียเมลามีน (Melamine Waste)

ผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis, ASTM C33) เท่ากับ FM1.25

SIEVE NO.	SIEVE OPENING (mm.)	WT. SIEVE (gm.)	WT. E+SAMPLE (gm.)	WT. SAMPLE RETAINED (gm.)	PERCENT RETAINED	CUMULATIVE PERCENT RETAINED	PERCENT FINER
4	4.75	505	505	0	0.00	0.00	100.00
8	2.36	483.4	495.3	0	0.00	0.00	100.00
16	1.18	407.7	595.3	0	0.00	0.00	100.00
30	0.6	385.9	415.4	50	10.00	10.00	90.00
50	0.3	545.7	553.8	125	25.00	35.00	65.00
100	0.15	341.6	348	225	45.00	80.00	20.00
pan		488.7	660.1	100	20.00	100	0
sum				500.00	100.00	125.00	
						FM 1.25	

ตารางที่ 3.4 ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) ของเศษของเสียเมลามีน (Melamine Waste)

ผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis, ASTM C33) เท่ากับ FM1.00

SIEVE NO.	SIEVE OPENING (mm.)	WT. SIEVE (gm.)	WT. E+SAMPLE (gm.)	WT. SAMPLE RETAINED (gm.)	PERCENT RETAINED	CUMULATIVE PERCENT RETAINED	PERCENT FINER
4	4.75	505	505	0	0.00	0.00	100.00
8	2.36	483.4	495.3	0	0.00	0.00	100.00
16	1.18	407.7	595.3	0	0.00	0.00	100.00
30	0.6	385.9	415.4	50	10.00	10.00	90.00
50	0.3	545.7	553.8	100	20.00	30.00	70.00
100	0.15	341.6	348	150	30.00	60.00	40.00
pan		488.7	660.1	200	40.00	100	0
sum				500.00	100.00	100.00	
						FM 1.00	

ตารางที่ 3.5 ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) ของเศษของเสียเมลามีน (Melamine Waste)

ผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis, ASTM C33) เท่ากับ FM0.75

SIEVE NO.	SIEVE OPENING (mm.)	WT. SIEVE (gm.)	WT. SIEVE + SAMP LE (gm.)	WT. SAMPLE RETAINED (gm.)	PERCENT RETAINED	CUMULATIVE PERCENT RETAINED	PERCENT FINER
4	4.75	505	505	0	0.00	0.00	100.00
8	2.36	483.4	495.3	0	0.00	0.00	100.00
16	1.18	407.7	595.3	0	0.00	0.00	100.00
30	0.6	385.9	415.4	25	5.00	5.00	95.00
50	0.3	545.7	553.8	50	10.00	15.00	85.00
100	0.15	341.6	348	200	40.00	55.00	45.00
pan		488.7	660.1	225	45.00	100	0
sum				500.00	100.00	75.00	
						FM 0.75	

ตารางที่ 3.6 ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) ของเศษของเสียเมลามีน (Melamine Waste)

ผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis, ASTM C33) เท่ากับ FM0.50

SIEVE NO.	SIEVE OPENING (mm.)	WT. SIEVE (gm.)	WT. SIEVE + SAMP LE (gm.)	WT. SAMPLE RETAINED (gm.)	PERCENT RETAINED	CUMULATIVE PERCENT RETAINED	PERCENT FINER
4	4.75	505	505	0	0.00	0.00	100.00
8	2.36	483.4	495.3	0	0.00	0.00	100.00
16	1.18	407.7	595.3	0	0.00	0.00	100.00
30	0.6	385.9	415.4	0	0.00	0.00	100.00
50	0.3	545.7	553.8	50	10.00	10.00	90.00
100	0.15	341.6	348	150	30.00	40.00	60.00
pan		488.7	660.1	300	60.00	100	0
sum				500.00	100.00	50.00	
						FM 0.50	

### 3.2.5 สารเพิ่มฟอง

สารเพิ่มฟองที่ใช้ในงานวิจัยเป็นสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ Tripple trees foaming agent ได้รับจาก บริษัท ช.จิตรผล จำกัด โดยสารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์จะถูกนำมาเจือจางกับน้ำในอัตราส่วน 1:40 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำให้เป็น โฟมด้วยเครื่องสร้างโฟมที่ต่อเข้ากับเครื่องอัดอากาศ ที่มีฟองอากาศขนาด เล็กตั้งแต่ 0.1-1.0 mm ซึ่งความหนาแน่นของโฟมประมาณ  $50 \text{ kg/m}^3$  ก่อนนำไปผสมกับคอนกรีตสดเป็น สารเพิ่มฟองเพื่อผลิตคอนกรีตมวลเบา



รูปที่ 3.6 สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์

## 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

### 3.3.1 เครื่องบดผงละเอียด (Recycling machinery) รุ่น N17

เครื่องบดผงละเอียดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ตัวเครื่องบดทำมาจากเหล็กหล่อ ใช้มอเตอร์ ขนาด 220 โวลต์ 2 แรงม้า มีสวิทช์เปิด-ปิด เครื่องบดละเอียดรุ่นนี้สามารถปรับเลือกบดหยาบละเอียด ตามขนาดของตะแกรงได้ อีกทั้งสามารถบดได้ ครั้งละ 20-50 กิโลกรัมต่อชั่วโมงขึ้นอยู่กับชนิดของ วัสดุดิบ เครื่องบดผงละเอียดใช้สำหรับบดย่อยวัสดุดิบด้วยกระบวนการเชิงกลให้มีขนาดเล็กลงเพื่อนำไป ผสมในคอนกรีตมวลเบา



รูปที่ 3.11 เครื่องบดผงละเอียด (Recycling machinery) รุ่น N17



### 3.3.2 เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน

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



รูปที่ 3.12 เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน

### 3.3.3 เครื่องสร้างฟองโฟมและเครื่องอัดอากาศ

เครื่องสร้างฟองโฟม (Foam generator) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ก) เป็นเครื่องสร้างฟองโฟม ได้รับจาก เกลิมชัย ไชยขจรรัตน์, 2559 ใช้งานร่วมกับเครื่องอัดอากาศ (Air compressor) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ข) หลักการทำงานของเครื่องสร้างฟองโฟมคือ เติมน้ำเพิ่มฟองที่เจือจางด้วยน้ำ (สารเพิ่มฟองต่อน้ำ 1:40 โดยน้ำหนัก) จากนั้นอัดอากาศโดยที่เครื่องสร้างฟองโฟมจะมีตัวปรับแรงดันเข้าถึงให้ความดันภายในถึงคงที่ 0.5 เมกะปาสกาล



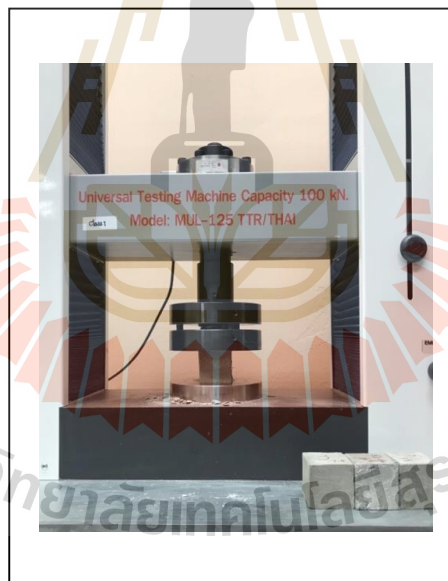
รูปที่ 3.9 เครื่องอัดอากาศและเครื่องสร้างฟองโฟม

### 3.3.4 เครื่องชั่งน้ำหนักและภาชนะที่ทราบปริมาตร

เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล รุ่น Pioneer (PA4120C) ยี่ห้อ OHAUS ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ความละเอียด 0.01 กรัม ชั่งได้สูงสุด 4,100 กรัม สำหรับชั่งเตรียมวัสดุในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบ และใช้ชั่งน้ำหนักคอนกรีตสดเพื่อคำนวณหาความหนาแน่นของคอนกรีตจากอัตราส่วนน้ำหนักของคอนกรีตสดต่อปริมาตรของภาชนะ มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้ภาชนะ (Container) ที่ทราบปริมาตรเป็นภาชนะปริมาตร 1 ลิตรใช้สำหรับบรรจุคอนกรีตสด

### 3.3.5 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machines capacity 100kN) รุ่น Model MUL-125 TTR/THAI กำลังสูงสุด 100 กิโลนิวตัน สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแสดงในรูปที่ 3.10 สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยให้แรงกดอัดที่ผิวด้านหน้าด้วยแรงกด 1 กิโลนิวตันต่อวินาที ในทิศทางตั้งฉากกับแนวแรง



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

### 3.3.6 เตาอบลมร้อน

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

### 3.3.7 แบบหล่อมาตรฐาน

แบบหล่อมาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบหล่อตามมาตรฐาน BS 1881 แสดงในรูปที่ 3.11 สำหรับขึ้นรูปชิ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ เพื่อใช้ทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อน ประกอบด้วยแบบหล่อ 2 แบบดังนี้

1) แบบหล่อมาตรฐานขนาด 50 mm x 50 mm x 50 mm ทำจากทองเหลือง ใช้สำหรับขึ้นรูปชิ้นทดสอบกำลังรับแรงอัด

2) แบบหล่อมาตรฐานขนาด 100 mm x 100 mm x 100 mm ทำจากเหล็กหล่อ ใช้สำหรับขึ้นรูปชิ้นทดสอบการดูดซึมน้ำ



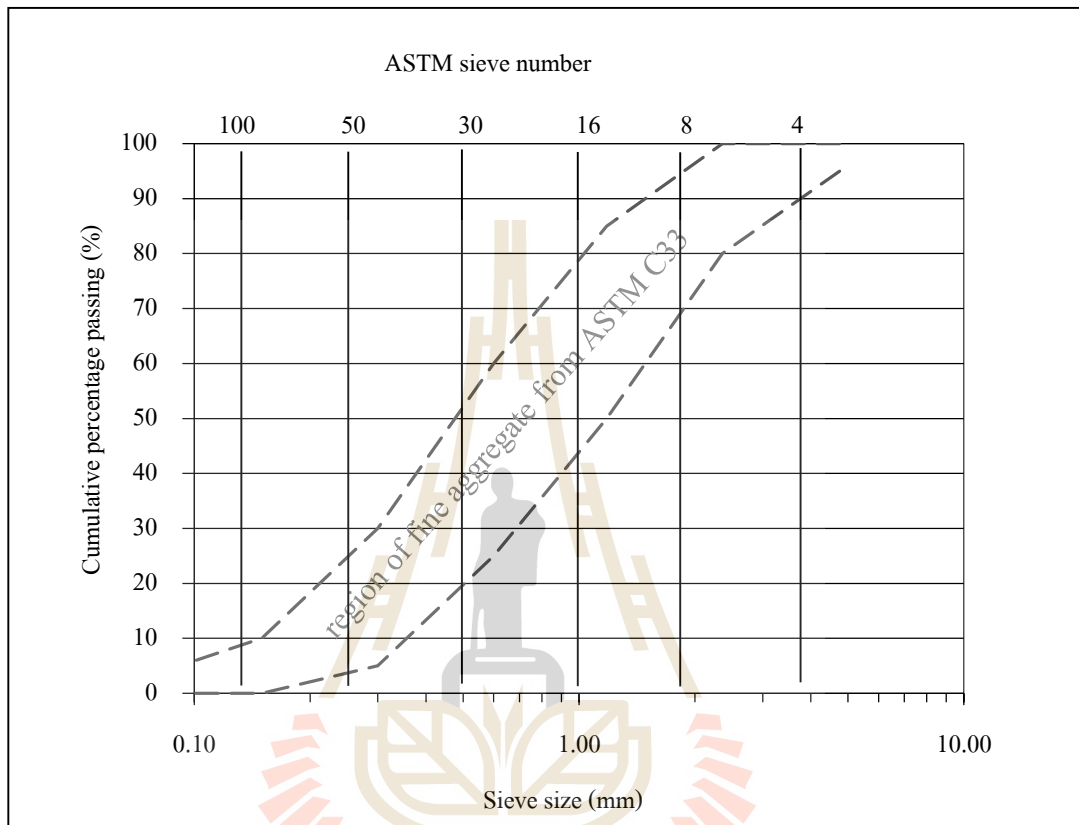
รูปที่ 3.11 แบบหล่อมาตรฐาน

## 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 การจัดเรียงตะแกรงร่อนสำหรับมวลรวมละเอียดจะเรียงช่องเปิดขนาดใหญ่อยู่ด้านบนสุดและช่องเปิดขนาดเล็กอยู่ด้านล่างสุด กล่าวคือเรียงจากตะแกรงร่อนเบอร์ 4, 8, 16, 30, 40, 50, และ 100 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ขนาดคละแสดงเป็นร้อยละของ

น้ำหนักผ่านสะสม (Cumulative percentage passing) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และขั้นตอนการคำนวณหา ร้อยละของน้ำหนักผ่านสะสมแสดงในตารางที่ 3.7



รูปที่ 3.12 ขนาดคละของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C33

โมดูลัสความละเอียด (Fineness modulus) เป็นตัวเลขที่บ่งบอกขนาดโดยประมาณของมวลรวม ซึ่งโมดูลัสความละเอียดคำนวณได้จากร้อยละของน้ำหนักค้างสะสม (Cumulative percentage retained) บนตะแกรงมาตรฐานหาค่าหนึ่งร้อย ถ้ามวลรวมมีค่าโมดูลัสความละเอียดสูงหมายถึงมวลรวมมีความละเอียดต่ำหรือหยาบ ค่าโมดูลัสความละเอียดต่ำหมายถึงมวลรวมมีความละเอียดมาก ซึ่งมาตรฐาน ASTM C33 กำหนดโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดอยู่ระหว่าง 2.3 ถึง 3.2 ค่าโมดูลัสความละเอียดสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบขนาดคละของมวลรวมให้ดีขึ้นเพื่อลดปริมาณการใช้ซีเมนต์เพสต์

ตารางที่ 3.7 การวิเคราะห์ขนาดคละของตัวอย่างด้วยตะแกรงร่อน

การวิเคราะห์ขนาดคละของตัวอย่างด้วยตะแกรงร่อน							
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 ตัวอย่างที่ ผ่าน 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 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุ

การดูดซึมน้ำ (Water absorption) เป็นสมบัติของวัสดุที่มีช่องว่างหรือโพรงภายในเนื้อ จะสามารถดูดซึมน้ำเข้าไปได้ ซึ่งสามารถคำนวณการดูดซึมน้ำจากผลต่างของความชื้นของมวลรวมใน สภาพอิมั้วผิวแห้งกับสภาพผิวแห้ง ตามมาตรฐาน C128 ดังสมการ 3.2

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

เมื่อ

$W_a$  = การดูดซึมน้ำ (%)

$B$  = น้ำหนักของวัสดุอิมั้วผิวแห้งซึ่งในอากาศ (g)

$A$  = น้ำหนักของวัสดุแห้งซึ่งในอากาศ (g)

## 3.5 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบา

### 3.5.1 การออกแบบส่วนผสม

ส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาประกอบด้วย ซีเมนต์ ทราย น้ำ เศษเมลามีน และสารเพิ่มฟอง เศษเมลามีนถูกนำมาใช้ประโยชน์โดยการแทนที่ทรายร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ด้วยเศษของเสียมเมลามีน เป็นมวลรวมละเอียดในคอนกรีตมวลเบากำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ทุกสูตรผสมคงที่เท่ากับ 0.5 และควบคุมความหนาแน่นคอนกรีตสดเท่ากับ 1,100 และ 1,300 kg/m<sup>3</sup>

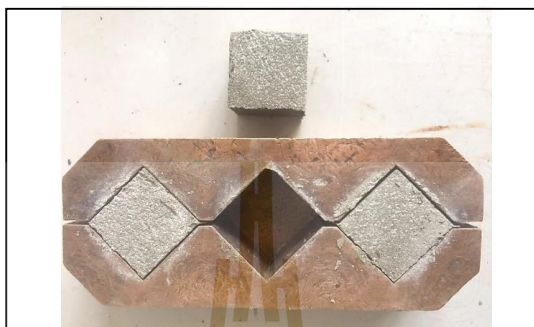
### 3.5.2 การเตรียมโฟม

คอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์เป็นคอนกรีตที่ผสมฟองโฟมเข้าไปเพื่อทำให้น้ำหนักเบาขึ้น ในงานวิจัยนี้จะใช้สารเพิ่มฟองเชิงพาณิชย์ Tripple trees สารเพิ่มฟองถูกนำมาเจือจางกับน้ำในอัตราส่วน 1:40 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำสารเพิ่มฟองเจือจางบรรจุลงในเครื่องสร้างฟองโฟม วิธีนี้เป็นวิธีสร้างฟองโฟมด้วยวิธีเชิงกล และอัดอากาศเข้าเครื่องที่ความดัน 0.5 bar เพื่อให้ได้ฟองโฟมขนาดเล็กตั้งแต่ 0.1-1.0 mm ซึ่งความหนาแน่นของฟองโฟมประมาณ 50 kg/m<sup>3</sup> ก่อนนำไปผสมกับคอนกรีตสดเรียกว่า Pre-formed foam method ตามมาตรฐาน ASTM C796

### 3.5.3 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

การขึ้นรูปขึ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์เริ่มจากการเตรียมแบบหล่อ ทาสารหล่อลื่นบาง ๆ ที่ด้านในของแบบหล่อ เพื่อความสะดวกในการถอดแบบเตรียมส่วนผสมโดยนำไปผสมเริ่มจากปูนซีเมนต์ ทราย เศษเมลามีน และน้ำ ตามลำดับ เมื่อส่วนผสมเข้ากันแล้วจึงผสมฟองโฟมที่เตรียมไว้ เมื่อผสมได้ความหนาแน่นตามที่กำหนดแล้วจะเทลงแบบหล่อโดยแบ่งเป็น 2 ชั้น แต่ละชั้นถูกกระทุ้งด้วยแท่งพลาสติกอย่างน้อย 35 ครั้ง เพื่อลดช่องว่างในขึ้นทดสอบคอนกรีต ภายหลังจากกระทุ้งให้เท

คอนกรีตสดให้ลั่นแบบหล่อเล็กน้อยแล้วทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง จึงทำการปาดหน้าตัวอย่างให้เรียบ คงคอนกรีตไว้ในแบบหล่อจนแข็งตัวภายใต้อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจะทำการถอดแบบหล่อออก ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

#### 3.5.4 การบ่มชิ้นทดสอบ

เมื่อครบกำหนด 24 ชั่วโมง คอนกรีตถูกถอดออกจากแบบหล่อ ชิ้นทดสอบถูกนำไปบ่มด้วยวิธีป้องกันการสูญเสียน้ำโดยหุ้มชิ้นทดสอบด้วยพลาสติกแรพที่ทำจากพอลิเอธิลีน (Polyethylene) พลาสติกแรพต้องแนบสนิทกับผิวของคอนกรีต (รูปที่ 3.14) เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำภายในคอนกรีต จากนั้นชิ้นทดสอบจะถูกนำไปใส่ถุงพลาสติกปิดปากถุงอีกหนึ่งชั้นแล้วนำไปบ่มในอุณหภูมิห้องจนครบอายุทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM C495



รูปที่ 3.14 การบ่มชิ้นทดสอบด้วยพลาสติก

### 3.6 การทดสอบคอนกรีตมวลเบา

#### 3.6.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

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

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

เมื่อ

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

$P_u$  = น้ำหนักกดสูงสุดของชิ้นทดสอบ (kg)

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

#### 3.6.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของคอนกรีตมวลเบาตามมาตรฐาน ASTM C642 สามารถทำได้โดยนำชิ้นทดสอบขนาด 100 mm x 100 mm x 100 mm อายุบ่มครบ 28 วัน แช่ในน้ำให้ท่วมทั้งชิ้นทดสอบเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดนำชิ้นจากน้ำแล้วใช้ผ้าซับน้ำส่วนเกินบนผิวและชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 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

$W_a$  = การดูดซึมน้ำ (%)

$W_w$  = น้ำหนักของชิ้นทดสอบเมื่อเปียก (kg)

$W_d$  = น้ำหนักของชิ้นทดสอบเมื่อแห้ง (kg)



### 3.7 การวิเคราะห์ระดับจุลภาค

#### 3.7.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM) เป็นอุปกรณ์สำหรับช่วยมองวัตถุที่มีขนาดเล็กเกินกว่าตามนุษย์จะสามารถมองเห็น กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (รูปที่ 3.15) ใช้คลื่นแสงที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นช่อง 400 ถึง 700 นาโนเมตร เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นทำให้ได้ภาพที่มีความคมชัดยิ่งขึ้นใช้คุณลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานในรูปแบบสองมิติโดยสามารถกำหนดกำลังขยายตามความต้องการได้ ชิ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาถูกตัดกึ่งกลางให้มีขนาดเล็กที่จะวางลงบนแท่นวางวัตถุและจัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายเพื่อดูโครงสร้างภายใน นอกจากนี้กล้อง OM ยังสามารถวัดขนาดของช่องว่างอากาศโดยประมาณได้



รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope, OM)

### 3.9 สรุป

ในบทที่ 3 นี้ นำเสนอวิธีการดำเนินงานที่อธิบายถึงรายละเอียดการเตรียมวัสดุและเครื่องมือการขึ้นรูปชิ้นทดสอบ วิธีการทดสอบ รวมไปถึงวิธีการวิเคราะห์ ทั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบสำหรับศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนขนาดละเอียดของเสียมลามาติดต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาที่นำเศษของเสียมลามาใช้ประโยชน์โดยนำมาแทนที่ทรายเพื่อทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา โดยแผนการทดลองเป็นการแทนที่ทรายด้วยเศษของเสียมลามาร้อยละ 25 ที่ควบคุมความหนาแน่นคอนกรีตสด 1,100 และ 1,300 kg/m<sup>3</sup> ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด และการดูดซึมน้ำ

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 บทนำ

การดำเนินงานวิจัยการใช้ประโยชน์เศษของเสียเมลามีนเป็นมวลรวมละเอียดในคอนกรีตมวลเบาได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ซึ่งได้ทำแผนการดำเนินงานเป็นการแทนที่ทรายร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ที่มีอิทธิพลต่อการรับแรงอัด และการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา ดังนั้นในบทนี้จึงจะกล่าวถึงผลการดำเนินงานวิจัยที่สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

ผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดคละของเศษของเสียเมลามีนต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา

- ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา
- กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา
- การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา

#### 4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดคละของเศษของเสียเมลามีน (Defect Melamine) ต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา

##### 4.2.1 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบา

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบา

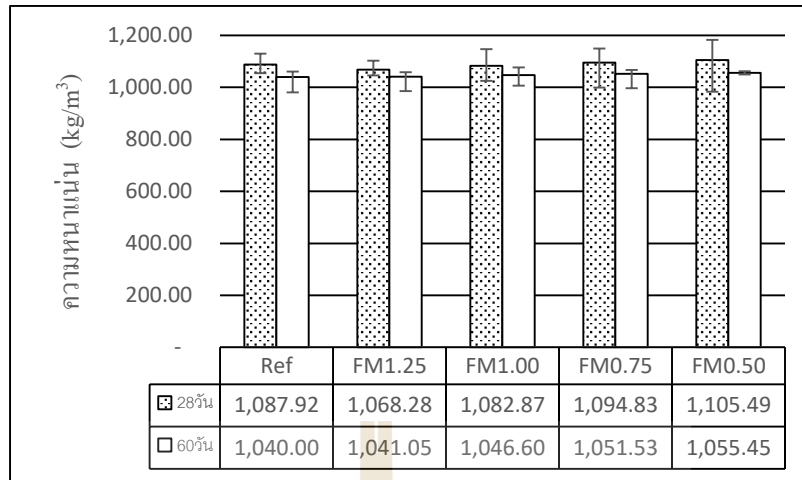
	ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ย ( $\text{kg/m}^3$ )		ความแปรปรวน
	อายุ 28 วัน	อายุ 60 วัน	
ความหนาแน่น $1,100 \text{ kg/m}^3$			
Ref	1,087.92	1,040.00	47.92
FM1.25	1,068.28	1,041.05	27.22
FM1.00	1,082.87	1,046.60	36.27
FM0.75	1,094.83	1,051.53	43.31
FM0.50	1,105.49	1,055.45	50.04

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบา (ต่อ)

	ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ย ( $\text{kg/m}^3$ )		ความแปรปรวน
	อายุ 28 วัน	อายุ 60 วัน	
ความหนาแน่น $1,300 \text{ kg/m}^3$			
Ref	1,281.69	1,260.00	21.69
FM1.25	1,299.74	1,255.00	43.81
FM1.00	1,293.80	1,263.80	30.00
FM0.75	1,295.67	1,250.00	45.67
FM0.50	1,294.42	1,252.90	41.52

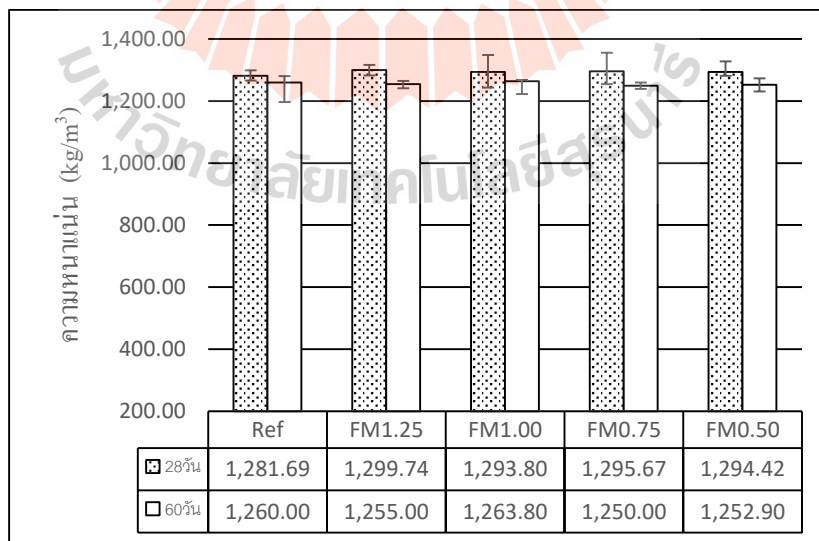
รายละเอียดผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งแสดงในตารางที่ 4.1 และค่าเฉลี่ยของผลทดสอบความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน ที่ความหนาแน่น  $1,100$  และ  $1,300 \text{ kg/m}^3$  แสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน อายุ 28 วัน มีค่าความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงกับความหนาแน่นของคอนกรีตสด และเมื่อมีอายุครบ 60 วัน จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นแห้งมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากโดยปกติน้ำภายในคอนกรีตจะเกิดการระเหยจากความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2556) และอาจเกิดจากค่าโมดูลัสความละเอียดที่ลดลงที่ทำขนาดละเอียดมีขนาดเล็กลงตามไปด้วย

จากการควบคุมความหนาแน่นแห้งตามมาตรฐาน มอก. เลขที่ 2601-2556 พบว่าการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่  $1,100 \text{ kg/m}^3$  แสดงในรูปที่ 4.1 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนอายุ 28 และ 60 วัน พบความแปรปรวนจากการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดไม่เกิน  $\pm 50 \text{ kg/m}^3$  ที่ Ref, FM1.25, FM1.00, FM0.75 และ FM0.50 การควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่  $1,300 \text{ kg/m}^3$  แสดงในรูปที่ 4.2 พบความแปรปรวนจากการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดไม่เกิน  $\pm 50 \text{ kg/m}^3$  ที่ Ref, FM1.25, FM1.00, FM0.75 และ FM0.50 เช่นเดียวกันคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น  $1,100 \text{ kg/m}^3$  กล่าวได้ว่าการควบคุมความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตที่เป็นไปตามมาตรฐาน มอก. คือ Ref, FM1.25, FM1.00, FM0.75 และ FM0.50



รูปที่ 4.1 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามี้นที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m<sup>3</sup>

ความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ 28 วันและ 60 วัน คอนกรีตจะมีความหนาแน่นลดลงตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น คอนกรีตผสมเศษของเสียมะลามี้นมีความแปรปรวนไม่เกิน  $\pm 50 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งอยู่ในมาตรฐานมอก. เลขที่ 2601-2556 การควบคุมของคอนกรีต เนื่องจากเศษของเสียมะลามี้นที่ใช้ในการแทนที่ทรายมีค่าการดูดซึมน้ำน้อยกว่าทรายทำให้สำหรับการใช้เศษของเสียมะลามี้นในคอนกรีตเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม (Ref) ไม่มีผลต่อการควบคุมความแปรปรวนของความหนาแน่นคอนกรีตมวลเบา



รูปที่ 4.2 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามี้นที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m<sup>3</sup>

การควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเทียบกับความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบา มีค่าความแปรปรวนเกิดจากการผสมเศษของเสียมะลามีในคอนกรีตมวลเบา และแปรปรวนน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม (Ref)

โดยเฉพาะสมบัติการดูดซึมน้ำของเสียมะลามียังส่งผลต่อความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาด้วย เนื่องจากเสียมะลามีที่มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าทราย ซึ่งส่งผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสม มีความแปรปรวน ทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตแปรปรวน

#### 4.2.2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา

ตารางที่ 4.2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามีที่ความหนาแน่น  $1,100 \text{ kg/m}^3$

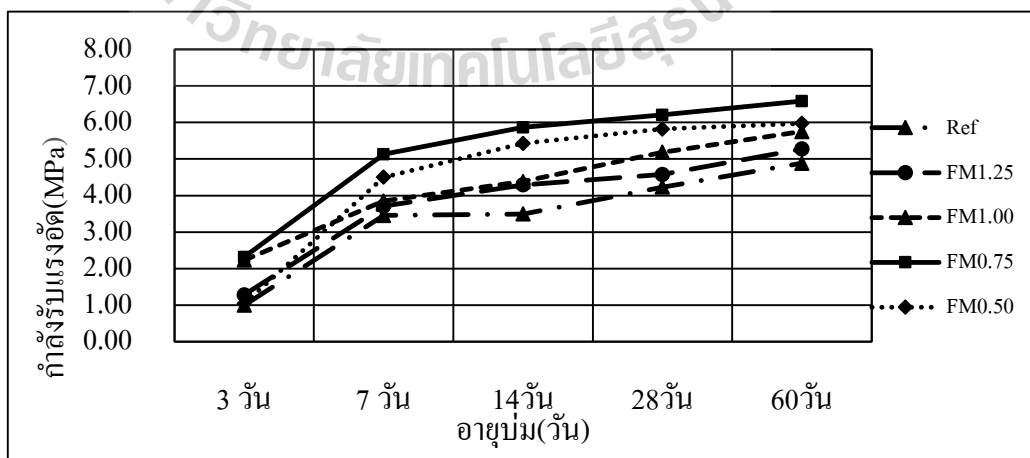
	3 วัน (MPa)	7 วัน (MPa)	14 วัน (MPa)	28 วัน (MPa)	60 วัน (MPa)
Ref	1.00	3.46	3.50	4.23	4.88
FM1.25	1.29	3.71	4.29	4.58	5.27
FM1.00	2.24	3.85	4.38	5.18	5.75
FM0.75	2.32	5.13	5.86	6.20	6.58
FM0.50	1.04	4.50	5.42	5.82	5.97

ค่าเฉลี่ยของผลกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามีที่อายุบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วันที่มีความหนาแน่น  $1,100 \text{ kg/m}^3$  แสดงตารางที่ 4.2 พบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามีในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 ที่โมดูลัสความละเอียดของมวลรวม FM1.25 ,FM1.00 ,FM0.75 และ FM0.50 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1.29 3.71 4.29 4.58 5.27 MPa, 2.24 3.85 4.38 5.18 5.75 MPa, 2.32 5.13 5.86 6.20 6.58 MPa และ 1.04 4.50 5.42 5.82 5.97 MPa ซึ่งสูงกว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาควบคุม (Ref) มีความหนาแน่น  $1,100 \text{ kg/m}^3$  ที่มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1.00 3.46 3.50 4.23 4.88 MPa

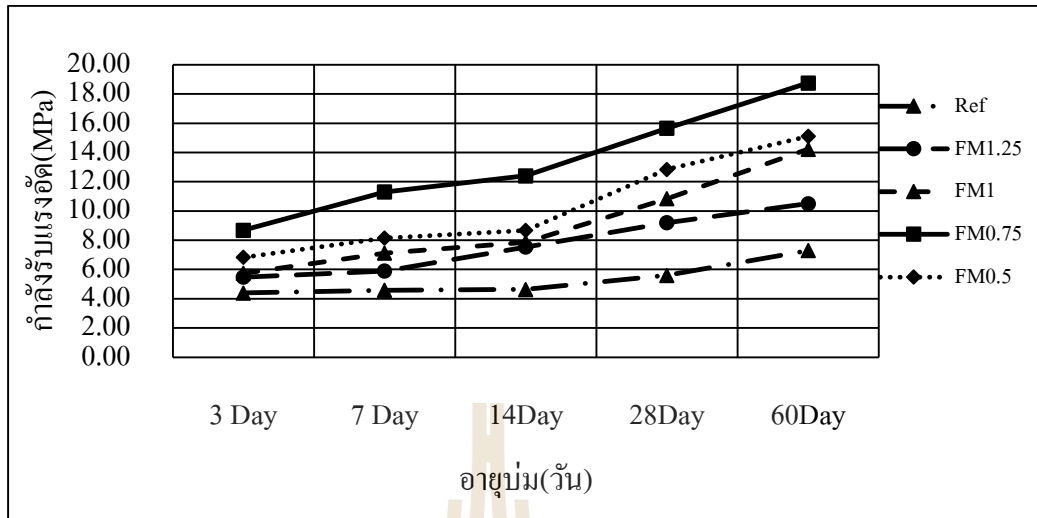
ตารางที่ 4.3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมลามีนที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m<sup>3</sup>

	3 วัน (MPa)	7 วัน (MPa)	14 วัน (MPa)	28 วัน (MPa)	60 วัน (MPa)
Ref	4.40	4.58	4.63	5.60	7.30
FM1.25	5.48	5.89	7.53	11.72	10.50
FM1.00	5.74	7.12	7.86	13.84	14.22
FM0.75	8.68	11.31	12.40	15.66	18.76
FM0.50	6.84	8.15	8.67	12.84	15.11

ค่าเฉลี่ยของผลกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมลามีนที่อายุบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วันที่มีความหนาแน่น 1,300 kg/m<sup>3</sup> แสดงตารางที่ 4.3 พบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 ที่โมดูลัสความละเอียดของมวลรวม FM1.25 ,FM1.00 ,FM0.75 และ FM0.50 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 5.48 5.89 7.53 11.72 10.50 MPa, 5.74 7.12 7.86 13.84 14.22 MPa, 8.68 11.31 12.40 15.66 18.76 MPa และ 6.84 8.15 8.67 12.84 15.11 MPa ซึ่งสูงกว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาควบคุม (Ref) มีความหนาแน่น 1,300 kg/m<sup>3</sup> ที่มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 4.40 4.58 4.63 5.60 7.30 MPa



รูปที่ 4.3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมลามีนที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m<sup>3</sup>

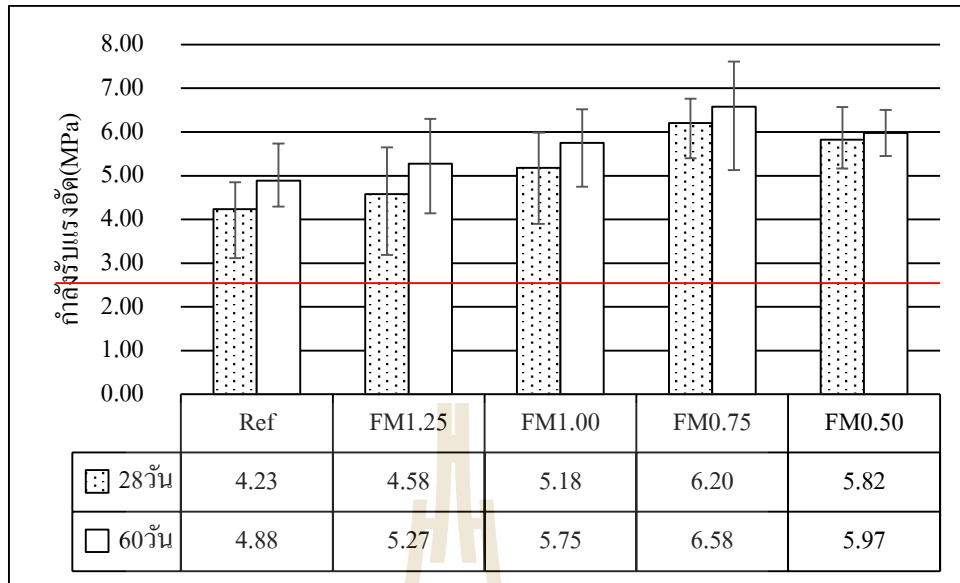


รูปที่ 4.4 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามี้นที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m<sup>3</sup>

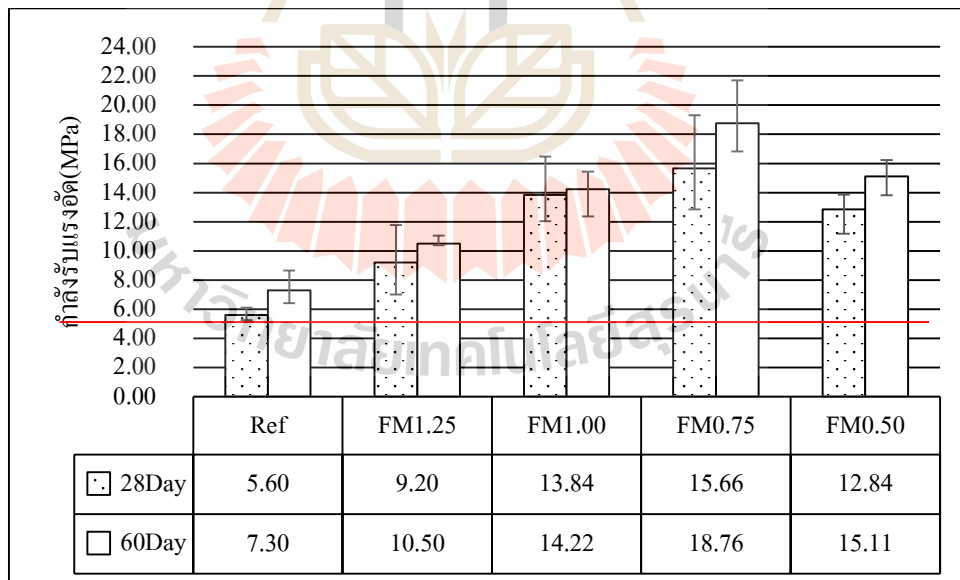
รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงรายละเอียดค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่อายุบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วัน ที่ ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับจากการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบามีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วง 3 7 และ 14 วัน เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ คอนกรีตจะเริ่มแข็งตัวและพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น จากนั้นการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาจะเริ่มเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่น้อยลงและคงที่ที่ 28 และ 30 วัน จนกระทั่งไม่มีน้ำเหลือในการทำปฏิกิริยาภายในคอนกรีต

คอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามี้นมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาควบคุม(Ref) ทั้งสองความหนาแน่น และคอนกรีตมวลเบาผสมเศษมะลามี้นที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m<sup>3</sup> ให้ผลกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษมะลามี้นที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m<sup>3</sup>

ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่มีอายุ 28 และ 60 วัน ที่ความหนาแน่น 1,000 และ 1,300 kg/m<sup>3</sup> แสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการใช้มวลรวมผสมของอัตราส่วนขนาดคละที่แตกต่างกันของเศษของเสียมะลามี้นในการแทนที่ทราย 25 เปอร์เซ็นต์ที่ค่า FM1.25 ,FM1.00 ,FM0.75 และ FM0.50 พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเทียบกับคอนกรีตมวลเบาควบคุม โดยเฉพาะคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามี้นแบบ FM0.75 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ทั้งสองความหนาแน่น



รูปที่ 4.5 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมลามีน  
ที่ความหนาแน่น  $1,100 \text{ kg/m}^3$  (ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน)



รูปที่ 4.6 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมลามีน  
ที่ความหนาแน่น  $1,300 \text{ kg/m}^3$  (ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน)

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



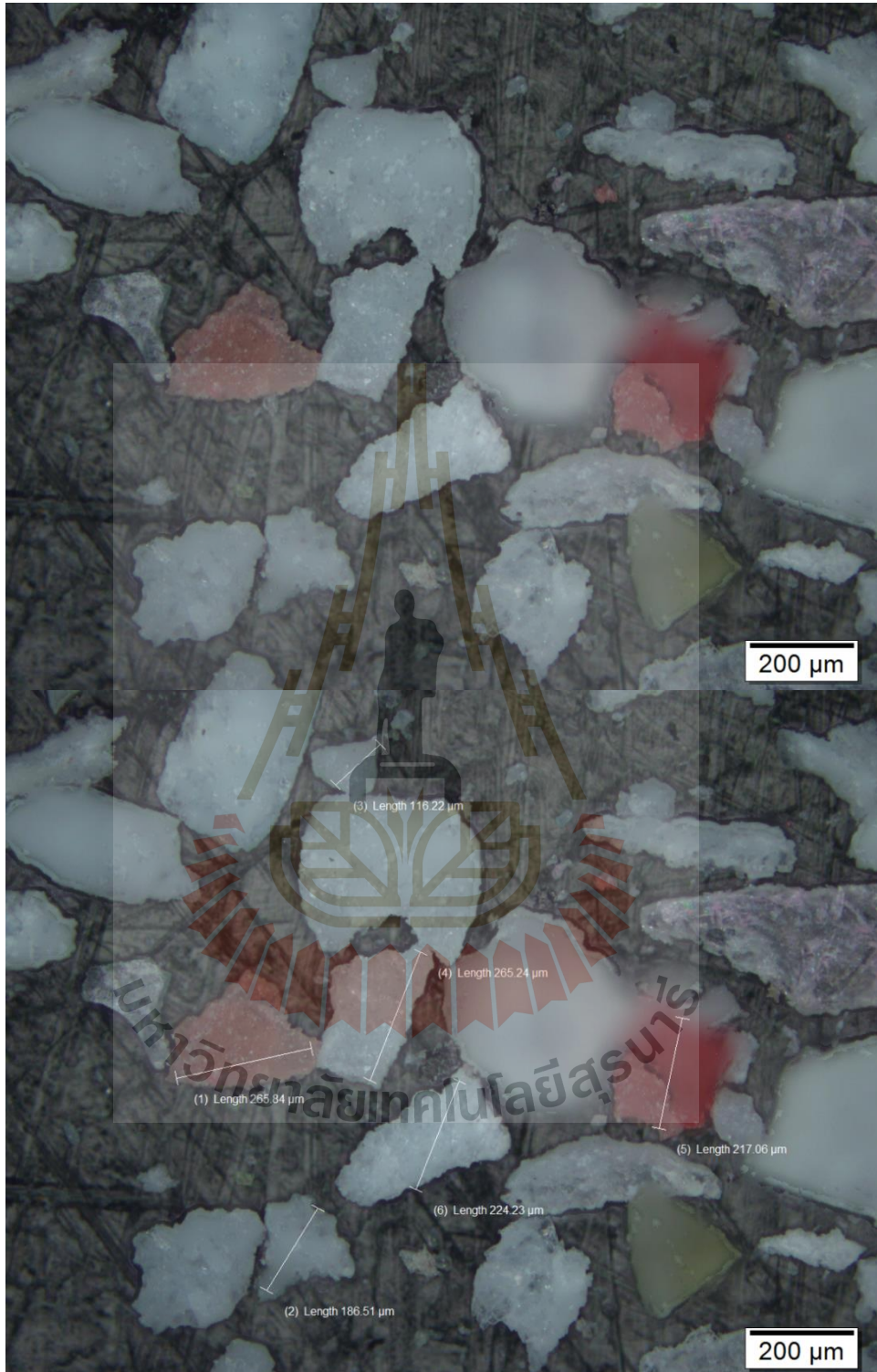
C12 และคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น  $1,300 \text{ kg/m}^3$  อยู่ในเกณฑ์ C14 ให้มีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 2.5 และ 5.0 MPa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับเกณฑ์ มอก. จะเห็นได้ว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนทุกสัดส่วนผสมสามารถให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ผ่านเกณฑ์ มอก. ทั้งความหนาแน่น 1,100 และ  $1,300 \text{ kg/m}^3$  ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

**4.2.3 อิทธิพลของขนาดผลของเศษของเสียมเมลามีนต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา**  
 การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เศษของเสียมเมลามีนแทนที่ทราย สามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้

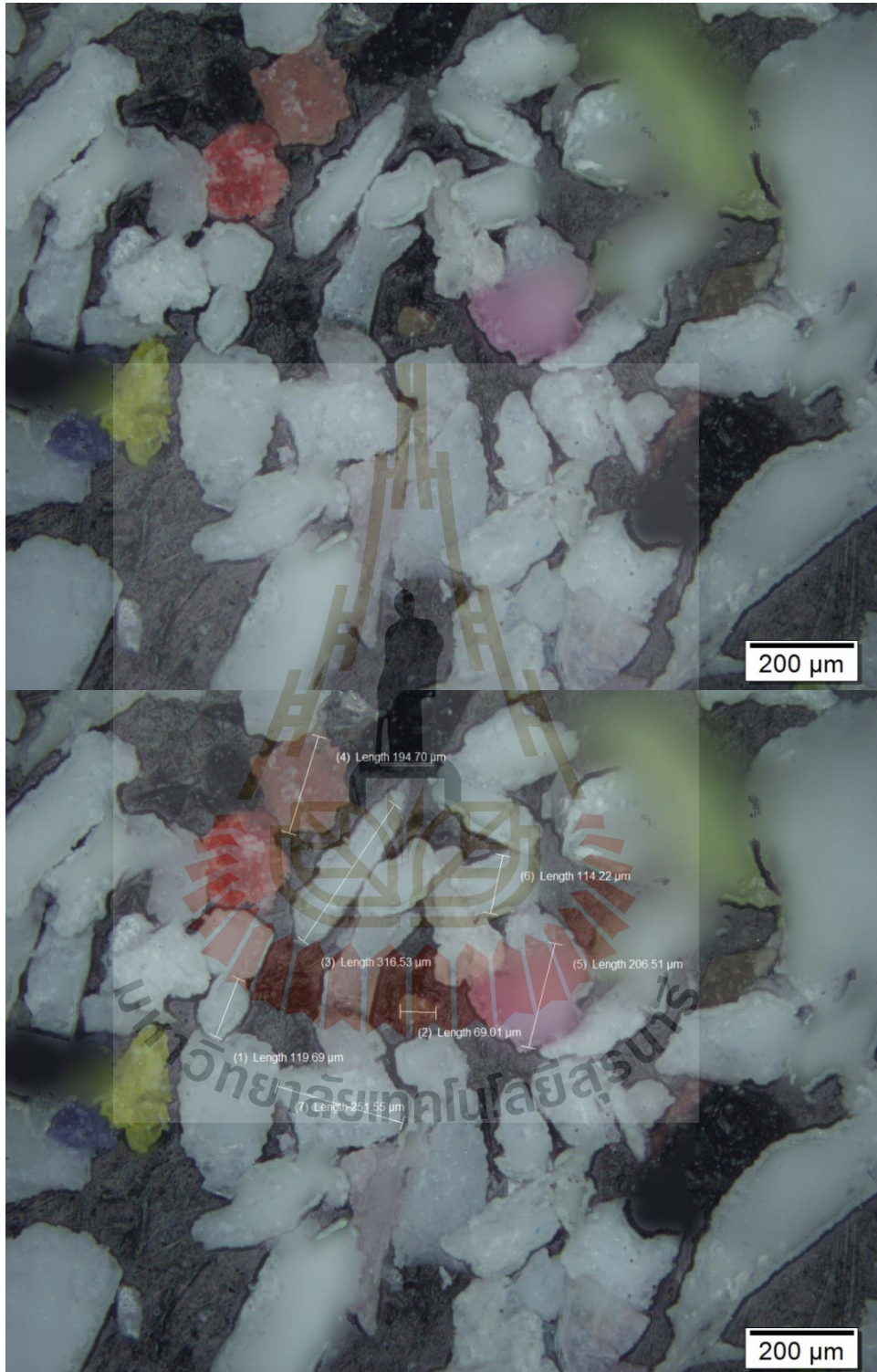
1) ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นเมื่อน้ำสัมผัสกับปูนซีเมนต์ ความสามารถในการดูดซึมน้ำของเศษของเสียมเมลามีนช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันสามารถเกิดได้ในบริเวณผิวของเศษของเสียมเมลามีนที่มีปูนซีเมนต์เกาะอยู่ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัด ทั้งนี้ความสามารถในการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนยังช่วยดูดซับน้ำส่วนเกินภายในเนื้อคอนกรีตที่เป็นสาเหตุของการเกิดช่องว่าง เมื่อช่องว่างภายในคอนกรีตลดลง เนื้อคอนกรีตจึงอัดตัวแน่นขึ้น ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น



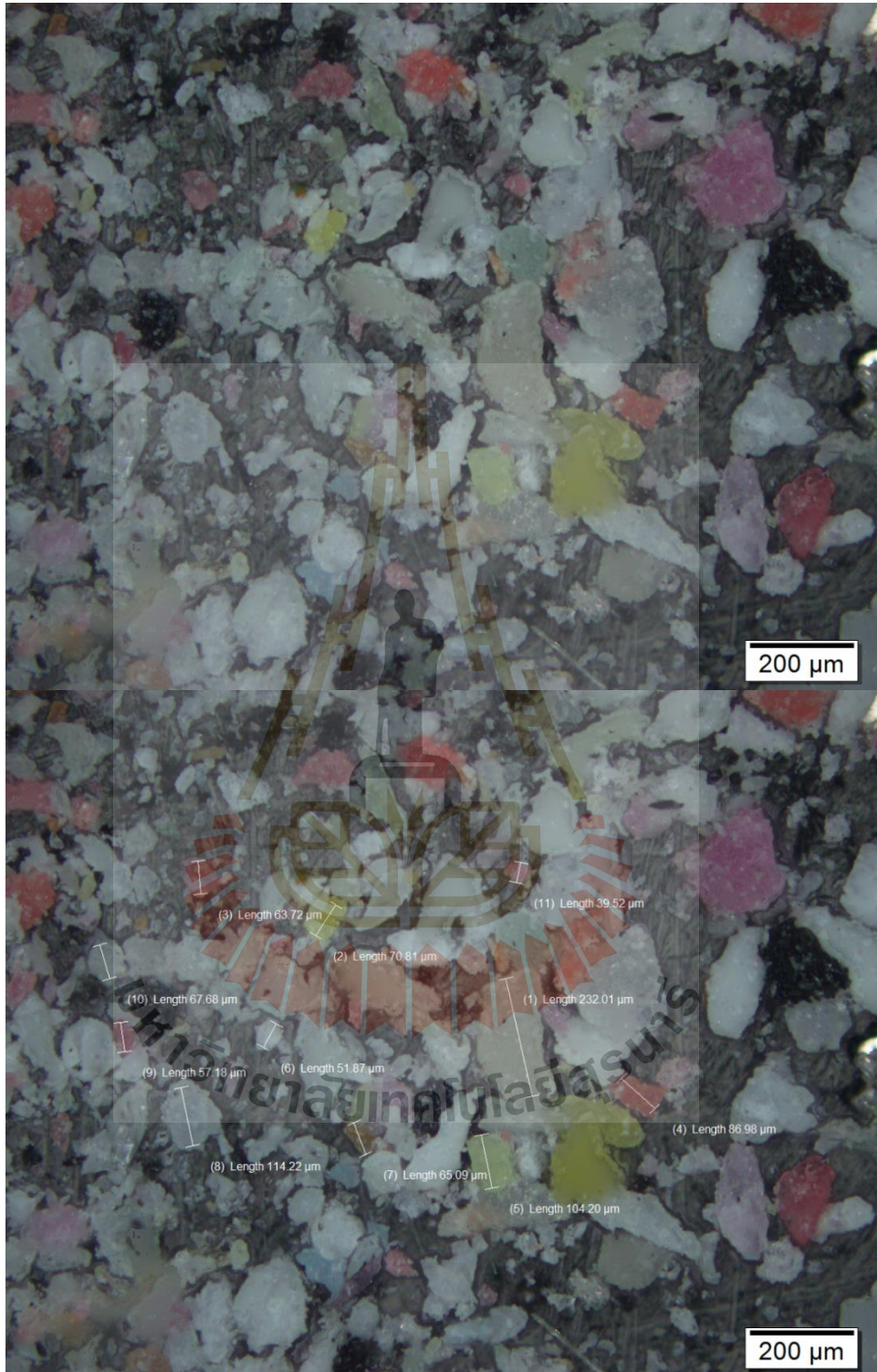
รูปที่ 4.7 ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่าของมวลรวมเศษของเสียมลามีนที่ FM1.25



รูปที่ 4.8 ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่าของมวลรวมเศษของเสียมลามินที่ FM1.00



รูปที่ 4.9 ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่าของมวลรวมเศษของเสียมลามินที่ FM0.75

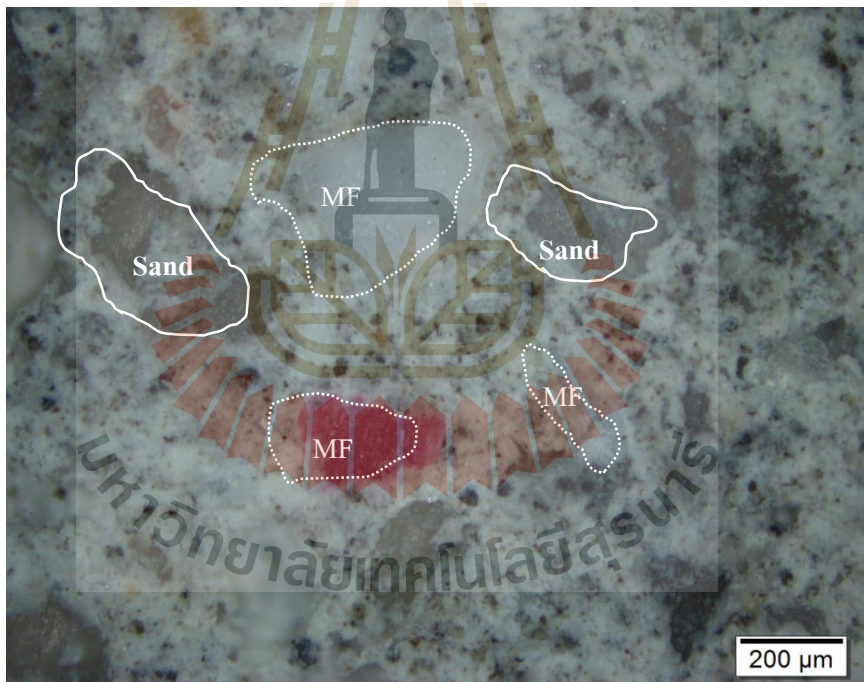


รูปที่ 4.10 ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่าของมวลรวมเศษของเสียมเมลามีนที่ FM0.50

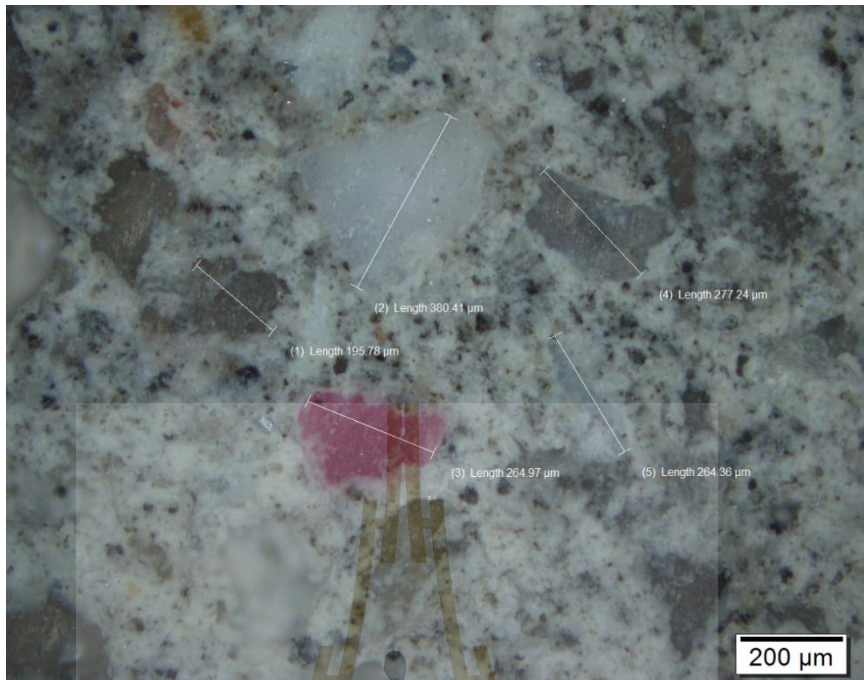


รูปที่ 4.11 ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่าของมวลรวมทราย

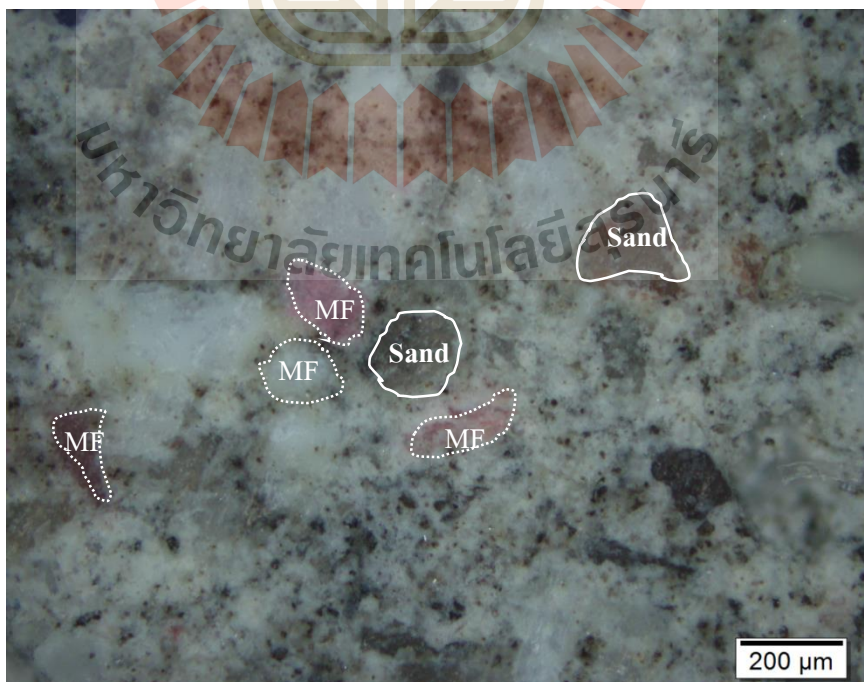
2) ขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่ดีสามารถลดช่องว่างภายในคอนกรีตที่เกี่ยวข้องกับการเกาะตัวของคอนกรีตมวลเบาส่งผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีต การรวมกันเศษของเสียมะลามีที่ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus: FM) กับทรายส่งผลให้ขนาดคละดีขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.7-4.10 ของมวลรวมเศษของเสียมะลามีด้วยภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 20 จะเห็นได้ว่าขนาดคละมีขนาดใหญ่เมื่อค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ FM1.25 และ FM1.00 แสดงดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.8 ตามลำดับขนาดคละมีขนาดเล็กเมื่อค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ FM0.50 แสดงดังรูปที่ 4.10 และจะมีขนาดคละมีขนาดที่หลากหลายในการรวมกันเศษของเสียมะลามีที่ค่า FM0.75 แสดงดังรูปที่ 4.9 สำหรับการรวมกันของทรายด้วยขนาดคละที่ดีขึ้นจึงส่งผลให้คอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ (Ref) ที่ผสมทรายเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 4.11) มีแนวโน้มแบบเดียวกันของทั้งสองความหนาแน่น



รูปที่ 4.12 ก) ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่าของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามี FM1.25 ที่ความหนาแน่น  $1,100 \text{ kg/m}^3$

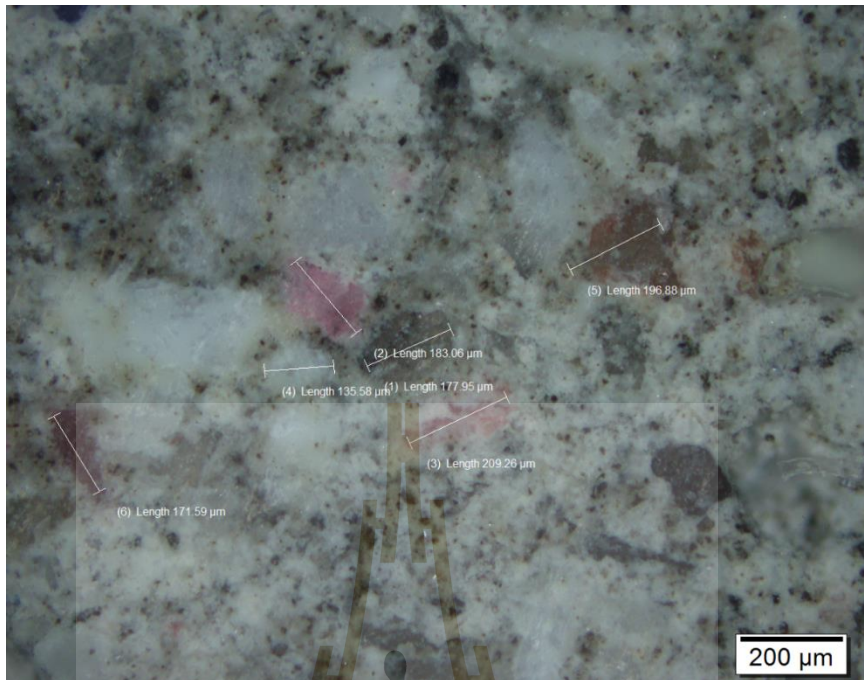


รูปที่ 4.12 ข) ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่า (แบบมีสเกลวัด) ของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามี้น FM1.25 ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m<sup>3</sup>

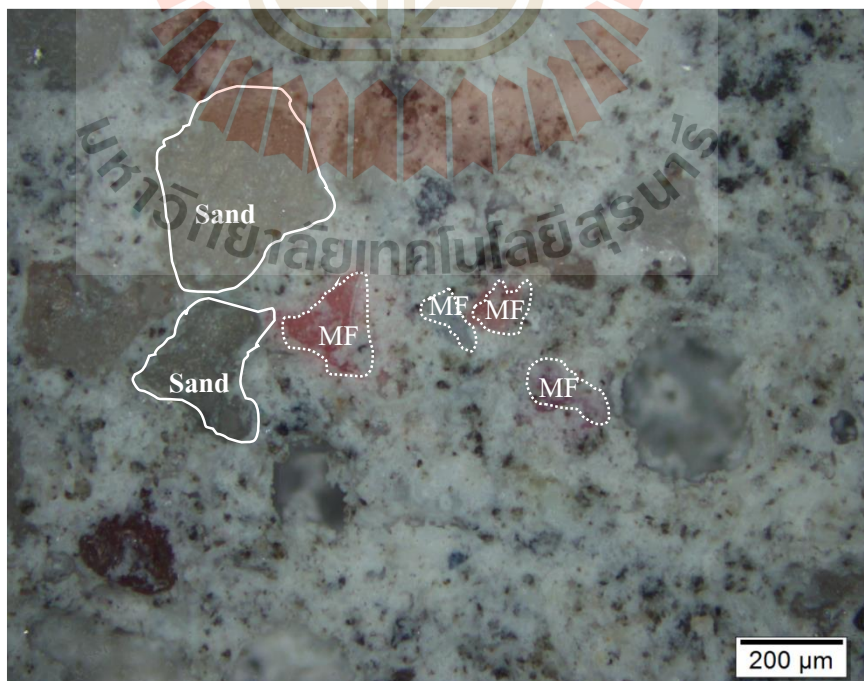


รูปที่ 4.13 ก) ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่าของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามี้น FM1.00 ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m<sup>3</sup>

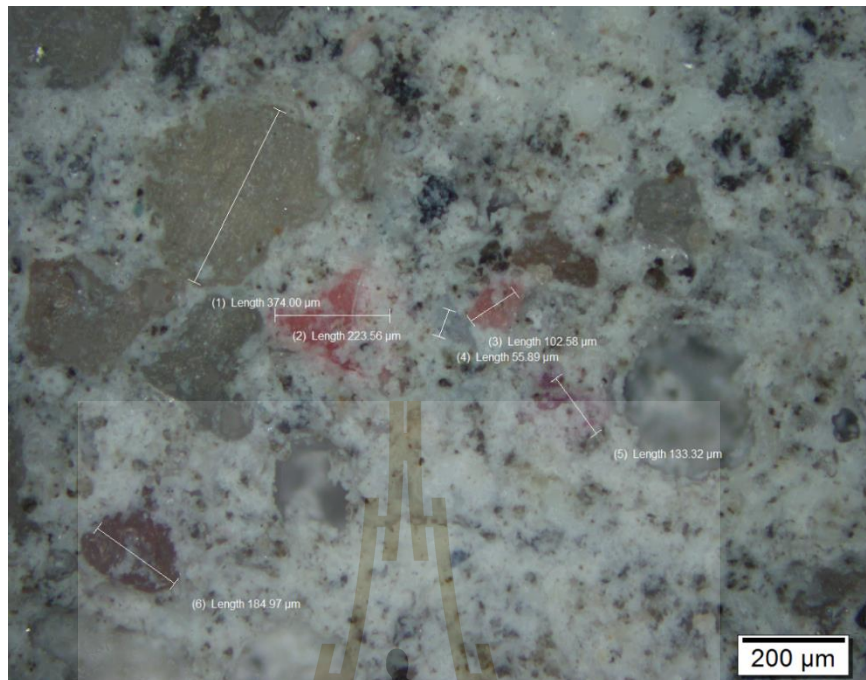




รูปที่ 4.13 ข) ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่า (แบบมีสเกลวัด) ของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามีน FM1.00 ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m<sup>3</sup>



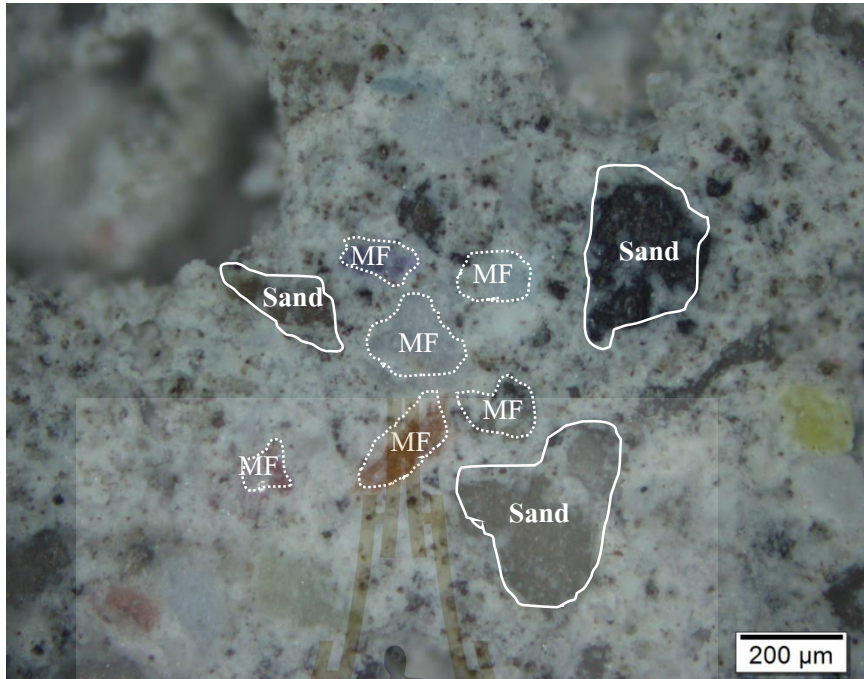
รูปที่ 4.14 ก) ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่าของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามีน FM0.50 ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m<sup>3</sup>



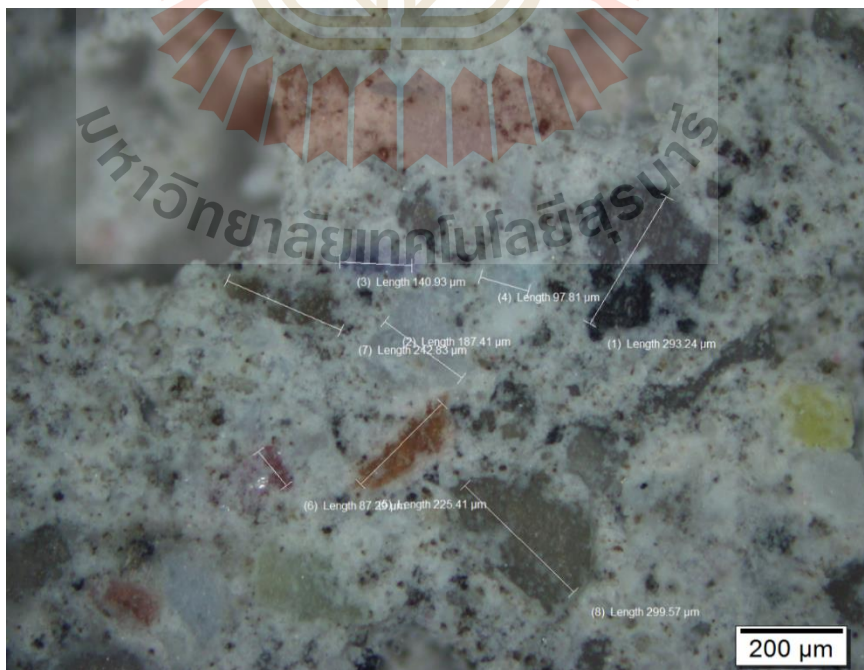
รูปที่ 4.14 ข) ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่า (แบบมีสเกลวัด) ของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามีน FM0.05 ที่ความหนาแน่น  $1,100 \text{ kg/m}^3$

เนื่องจากที่ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus: FM) มากแสดงถึงขนาดของขนาดละมีขนาดใหญ่แต่มวลรวมเศษของเสียมะลามีนมีช่องว่างมากแสดงในรูปที่ 4.12 ก - ข และ รูปที่ 4.13 ก - ข ส่งผลต่อการยึดเกาะกันของมวลรวมทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามีน FM1.25 และ FM1.00 ลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามีน FM0.75

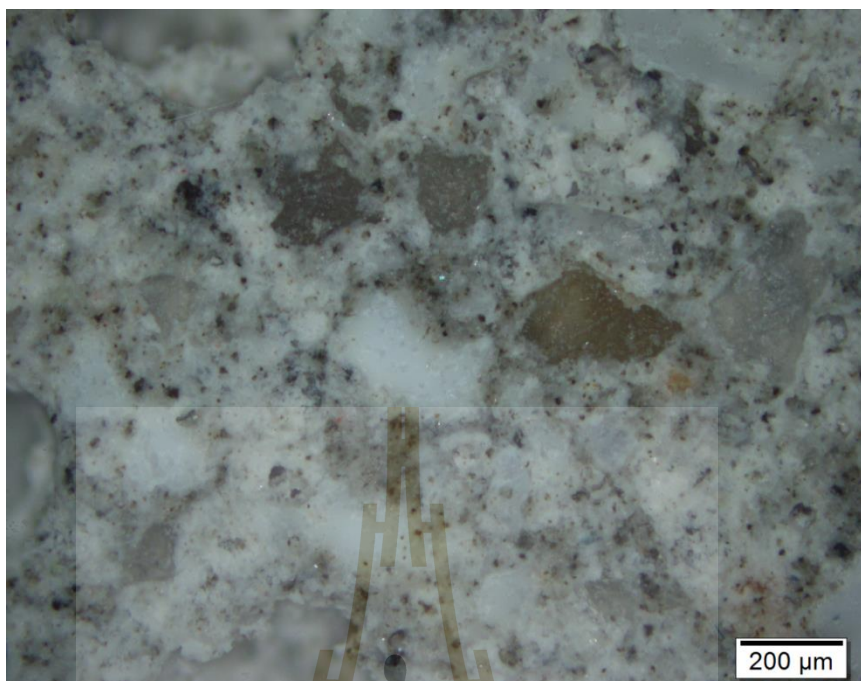
และที่ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus: FM) น้อยแสดงถึงขนาดของขนาดละมีขนาดเล็กทำให้พื้นที่ในการรับแรงน้อยแสดงในรูปที่ 4.14 ก - ข ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามีน FM0.50 ลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามีน FM0.75



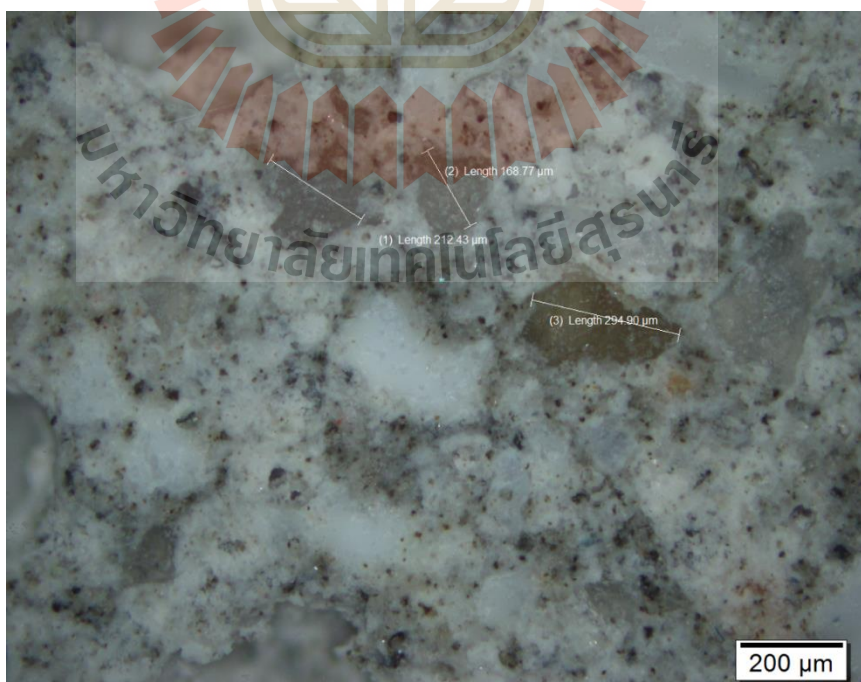
รูปที่ 4.15 ก) ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่าของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมลามีน FM0.75 ที่ความหนาแน่น  $1,100 \text{ kg/m}^3$



รูปที่ 4.15 ข) ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่า (แบบมิสเกลวัด) ของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมลามีน FM0.75 ที่ความหนาแน่น  $1,100 \text{ kg/m}^3$



รูปที่ 4.16 ก) ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่าของคอนกรีตมวลเบาควบคุม (Ref) ที่ความหนาแน่น  $1,100 \text{ kg/m}^3$



รูปที่ 4.16 ข) ภาพขยายด้วยกล้อง OM ที่กำลังขยาย 10 เท่า (แบบมีสเกลวัด) ของคอนกรีตมวลเบาควบคุม (Ref) ที่ความหนาแน่น  $1,100 \text{ kg/m}^3$

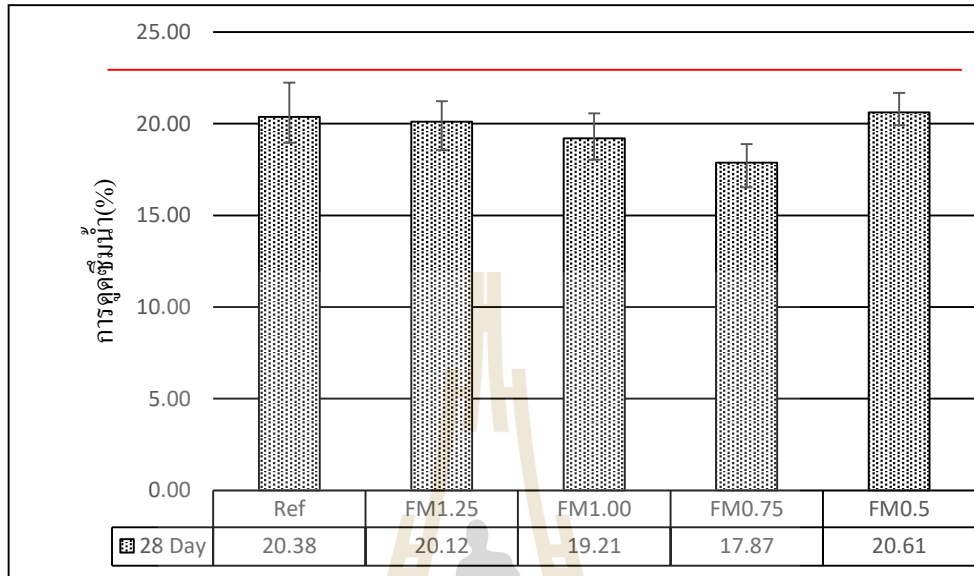
เพราะฉะนั้นค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus: FM) เท่ากับ 0.75 ที่มีขนาดของขนาดคละมวลรวมเศษของเสียมลามีที่เหมาะสมแสดงในรูปที่ 4.15 ก - ข เหมาะแก่การนำไปใช้งานและให้ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) สูง

การใช้มวลรวมทราย 75% และเมลามี 25% เข้าไปแทรกอยู่ตามช่องว่างของทราย ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus: FM) เท่ากับ 0.75 มีขนาดของขนาดคละทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่เป็นคุณสมบัติของขนาดคละที่ดีตาม ASTM C33 ส่งผลต่อการยึดเกาะกันระหว่างมวลรวมทำให้เนื้อของมวลรวมมีความแน่นขึ้นและช่องว่างระหว่างมวลรวมมีขนาดเล็กเมื่อสังเกตเปรียบเทียบจากคอนกรีตควบคุม (Ref) ไม่ผสมเศษของเสียมลามีแสดงดังรูปที่ 4.16 ก - ข เนื่องจากขนาดคละของเศษของเสียมลามีมีขนาดเล็กกว่าทราย ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมลามีเพิ่มขึ้นผลสอดคล้องกันว่าค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus: FM) ของขนาดคละที่ให้ค่าความแข็งแรงดีสุดจะไม่ใช่ว่าค่าสูงมากหรือต่ำมากแต่จะอยู่ตรงกลางหรือค่าที่มีขนาดของขนาดคละที่หลากหลาย (Ammari, Madiha ZJ, and Richard Fowler (2017) และ Kumar, D. Pavan, and C. Sashidhar (2018))

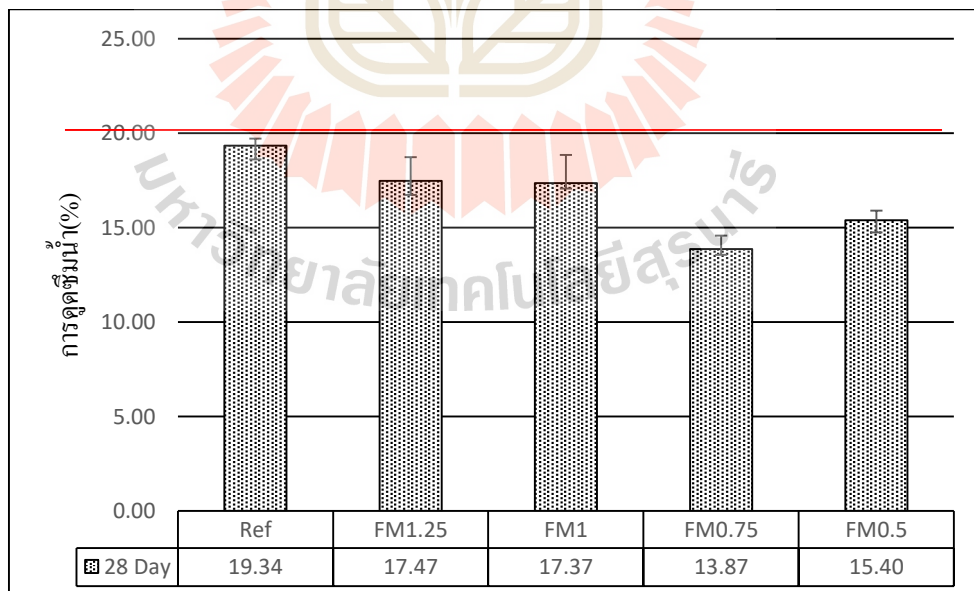
ตารางที่ 4.4 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา

	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)					
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ความหนาแน่น 1,100 kg/m <sup>3</sup>						
Ref	20.15	18.96	22.24	20.38	20.16	20.37
FM1.25	21.23	20.80	19.49	18.55	20.50	20.12
FM1.00	19.79	19.09	20.61	21.56	19.98	20.21
FM0.75	20.28	18.69	13.16	16.94	20.29	17.87
FM0.50	20.33	21.68	21.20	19.95	19.92	20.61
ความหนาแน่น 1,300 kg/m <sup>3</sup>						
Ref	19.33	18.73	18.86	20.01	19.78	19.34
FM1.25	17.72	17.94	17.05	15.91	18.73	17.47
FM1.00	14.45	14.45	19.86	19.07	18.99	17.37
FM0.75	14.57	14.09	13.07	13.12	14.50	13.87
FM0.50	15.82	14.79	14.61	15.90	15.88	15.40

#### 4.2.4 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา



รูปที่ 4.17 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสี้ยเมลามีนที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m<sup>3</sup>



รูปที่ 4.18 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสี้ยเมลามีนที่ความหนาแน่น 1,300 kg/m<sup>3</sup>

รายละเอียดผลการทดสอบการดูดซึมน้ำแสดงในตารางที่ 4.4 และค่าเฉลี่ยของผลทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่อายุบ่ม 28 วัน ที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 kg/m<sup>3</sup> แสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามี้นต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ และมีแนวโน้มดูดซึมน้ำลดลงมากขึ้น เมื่อมีส่วนของค่าโมดูลัสความละเอียดของเศษของเสียมะลามี้นมีค่าลดลงซึ่งหมายถึงขนาดกะที่มีขนาดเล็กลงตามไปด้วย คอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามี้นมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดคือที่ FM0.75 ทั้งสองความหนาแน่น และคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,100 kg/m<sup>3</sup> มีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,300 kg/m<sup>3</sup>

การแทนที่ทรายด้วยเศษของเสียมะลามี้นส่งผลให้คอนกรีตมวลเบาที่มีค่าการดูดซึมน้ำลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ สามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้

1) คุณสมบัติการดูดซึมน้ำของเศษของเสียมะลามี้นที่มีค่าต่ำกว่าทราย ซึ่งทรายมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ที่ 0.33% และเศษของเสียมะลามี้นมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ที่ 0.17% โดยเฉพาะเศษของเสียมะลามี้นที่มีลักษณะเป็นทั้งฝุ่นที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าทรายและเม็ด ส่งผลให้การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาต่ำลง

2) ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาซึ่งส่งผลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาสำหรับคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีค่าการดูดซึมน้ำสูง เนื่องจากความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาแปรผกผันกับความพรุน กล่าวคือคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีความพรุนสูงเพื่อให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบา น้ำจะแทรกเข้าไปภายในรูพรุนทำให้คอนกรีตมวลเบาที่มีค่าการดูดซึมน้ำสูงขึ้น ที่ความหนาแน่น 1,100 kg/m<sup>3</sup> มีคุณสมบัติการดูดซึมน้ำมากกว่า 1,300 kg/m<sup>3</sup>

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตมวลเบาแบบเต็มฟองอากาศ (มอก. เลขที่ 2601-2556) กำหนดค่าการดูดซึมน้ำสำหรับคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,100 kg/m<sup>3</sup> อยู่ในเกณฑ์ C12 และคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,300 kg/m<sup>3</sup> อยู่ในเกณฑ์ C14 ที่มีการดูดซึมน้ำไม่มากกว่าร้อยละ 23 และร้อยละ 20 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามี้นความหนาแน่น 1,100 kg/m<sup>3</sup> และคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามี้นความหนาแน่น 1,300 kg/m<sup>3</sup> ผ่านเกณฑ์ มอก. ทั้งหมด

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลขนาดคละของอัตราอนุภาคเศษของเสียมเมลามีน (Defect Melamine) ที่เปลี่ยนแปลงโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus :FM) เปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ(Ref) และเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมเมลามีน จากผลการศึกษานี้สรุปได้ดังนี้

##### 5.1.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดคละของเศษของเสียมเมลามีน (Defect Melamine) ต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา

การใช้ประโยชน์เสียมเมลามีนเป็นมวลรวมละเอียดในคอนกรีตมวลเบา โดยทรายถูกแทนที่ด้วยเศษของเสียมเมลามีน (Defect Melamine) ที่โมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus :FM) ของขนาดคละมวลรวมเท่ากับ FM1.25, FM1.00, FM0.75 และ FM0.50 ในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก พบว่าเศษของเสียมเมลามีนสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาได้ และให้กำลังรับแรงอัดได้สูงที่สุดคือ FM0.75 ทั้งความหนาแน่น  $1,100 \text{ kg/m}^3$  และ  $1,300 \text{ kg/m}^3$  โดยเฉพาะค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมเมลามีนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการรวมกันของมวลรวมละเอียดของเศษของเสียมเมลามีนมีผลที่ดีทำให้ขนาดคละของมวลรวมละเอียดดีขึ้น ทำให้ช่องว่างระหว่างคอนกรีตลดลง และสามารถแทรกตัวในช่องว่างระหว่างวัสดุอื่นได้ดีขึ้น และเศษของเสียมเมลามีนสามารถกระจายตัวได้ดี จึงช่วยเสริมแรงให้คอนกรีตรับแรงอัดได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ

##### 5.1.2 ผลการเปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา

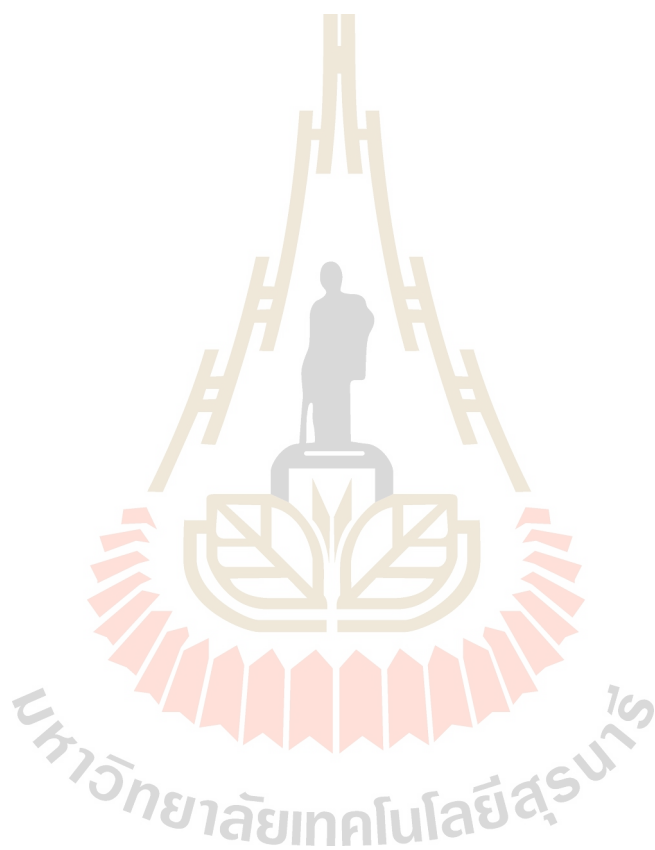
ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมเมลามีนมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ เนื่องจากเศษของเสียมเมลามีนมีค่าการดูดซึมน้ำ 0.17 % ซึ่งมีค่าต่ำกว่าทราย 0.33% ทำให้คอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมเมลามีนมีค่าการดูดซึมน้ำลดลงและลดได้ดีที่ FM0.75 ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบการดูดซึมน้ำทั้งความหนาแน่น  $1,100 \text{ kg/m}^3$  และ  $1,300 \text{ kg/m}^3$

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

หวังเป็นอย่างยิ่งว่า องค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษานี้จะก่อให้เกิดเศษของเสียมเมลามีน โดยใช้เป็นมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายของคอนกรีตมวลเบา ที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดมีค่าโมดูลัส



ความละเอียด (Fineness Modulus) ของขนาดละเอียดเท่ากับ FM0.75 ผู้วิจัยแนะนำให้ผลิตในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติการดูดซึมน้ำผ่านเกณฑ์มาตรฐาน



## รายการอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2558). **สถานการณ์การกำจัดขยะมูลฝอยและของเสียอันตราย**. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2558 รอบ 6 เดือน. หน้า 28-38
- เกียรติ สุดา สม นา, & ปริญญา จินดา ประเสริฐ. (2015). **ผลของอัตราส่วน Ca: Si และ Na: Al ต่อ กำลังอัดและลักษณะโครงสร้างผลึกของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยที่มีแคลเซียมสูง** *Effect of Ca: Si and Na: Al Ratio on Compressive Strength and Microstructure of High Calcium Fly Ash Geopolymer*. *RMUTI JOURNAL*, 8(3), 113-125.
- กฤติยา วงศ์เลน. (2555). **อิทธิพลของการดูดซึมน้ำและอุณหภูมิขึ้นรูปต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ทิพวรรณ บุญย์เพิ่ม.(2550). **วัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรสิ่งแวดล้อม(Green Building Material)**.วารสารการจัดการสมัยใหม่ หน้า134-141
- ธารา บัวคำศรี (2557). **ไฟไหม้บ่อขยะที่สมุทรปราการ และความละเอียดของนโยบายสิ่งแวดล้อมไทย**. แหล่งที่มา: <http://www.greenpeace.org/seasia/th/news/blog1/blog/48554/> คืบเมื่อ 8 กันยายน 2560
- จารุพันธ์ ไพพูลพิมพ์, & เกรียงศักดิ์ แก้ว กุล ชัย. (2015). **ผลกระทบของปริมาณทรายและน้ำต่อ ความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์ลูล่า**. วารสาร วิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม. อบ., 8(2), 26-35.
- 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) คืบเมื่อ 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**. มหาวิทยาลัยรามคาแหง พิมพ์ครั้งที่ 6, 423 หน้า
- ศศิประภา ศรีไชโย.(2559).**อิทธิพลของอัตราส่วนผสมระหว่างเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- สุชน เสถียรยานนท์ (2551). **เมลามีน**. ก้าวทันโลกวิทยาศาสตร์. ปีที่ 8(2), หน้า 57-64
- Ammari, M. Z., & Fowler, R. (2017). **Experimental study of the effect of limestone grading on some mechanical properties of concrete**. In MATEC Web of Conferences (Vol. 120, p. 02007). EDP Sciences.
- Albano, C., Camacho, N., Hernandez, M., Matheus, A., & Gutierrez, A. (2009). **Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios**. Waste Management, 29(10), 2707-2716.
- 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 C495/C495M-12 (2012). **Standard Test Method for Compressive Strength of Lightweight Insulating 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.
- Barbuta, M., Diaconu, D., Serbanoiu, A. A., Burlacu, A., Timu, A., & Gradinaru, C. M. (2017). **Effects of tire wastes on the mechanical properties of concrete**. Procedia Engineering, 181, 346-350.
- Batayneh, M., Marie, I., & Asi, I. (2007). **Use of selected waste materials in concrete mixes**. Waste management. 27(12), 1870-1876.
- 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.
- Choi, Y. W., Moon, D. J., Chung, J. S., & Cho, S. K. (2005). **Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete**. Cement and concrete research, 35(4), 776-781.
- Great-PET (2013). **พลาสติก (Plastic)**. แหล่งที่มา: <http://www.great-pet.com/th/ค้นเมื่อ 8 กันยายน 2560>

- Goodman, S.W. (1998). **Handbook of Thermoset Plastics**. (2nd Edition), Raytheon Systems Company  
EI, Segundo, California.
- Ismail, Z. Z., & Al-Hashmi, E. A. (2008). **Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement**. *Waste management*, 28(11), 2041-2047.
- Ismail, Z. Z., & Al-Hashmi, E. A. (2009). **Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete**. *Waste management*, 29(2), 655-659.
- Jitchaiyaphum, K., Sinsiri, T., & Chindaprasirt, P. (2011). **Cellular lightweight concrete containing pozzolan materials**. *Procedia Engineering*, 14, 1157-1164.
- Kumar, D. P., & Sashidhar, C. (2018). **Effect of Fineness Modulus of Manufactured Sand on Mechanical Properties of Self Compacting Concrete**. *Indian Concrete Journal* : 77.
- Lima, P. R. L., Leite, M. B., & Santiago, E. Q. R. (2010). **Recycled lightweight concrete made from footwear industry waste and CDW**. *Waste management*, 30(6), 1107-1113.
- National Metal and Materials Technology Center (MTEC) (2007). **พลาสติกย่อยสลายได้: เทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสภาพแวดล้อมเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน** แหล่งที่มา:  
[http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_Plastic/type\\_and\\_usage\\_plas.html](http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_Plastic/type_and_usage_plas.html) ค้น  
เมื่อ 8 กันยายน 2560
- Panyakapo, P., & Panyakapo, M. (2008). **Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete**. *Waste management*, 28(9), 1581-1588.
- Phaiboo Panyakapo and Mallika Panyakapo, M. (2008). **Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete**. *Waste Management*, vol.28, 1581-1588.
- Powers, T.C., and Helmuth, R.A. (1953). **Theory of Volume Changes in Hardened Portland- Cement Paste During Freezing**. *Proceedings of the 32<sup>nd</sup> Annual Meeting of the Highway Research Board*, vol.32: 13-16 January; Washington, D.C., 285-297.
- Ribeiro, M. C. S., Meira-Castro, A. C., Silva, F. G., Santos, J., Meixedo, J. P., Fiúza, A., ... & Alvim, M. R. (2015). **Re-use assessment of thermoset composite wastes as aggregate and filler replacement for concrete-polymer composite materials: A case study regarding GFRP pultrusion wastes**. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 417-426.
- Senthamarai, R. M., & Manoharan, P. D. (2005). **Concrete with ceramic waste aggregate**. *Cement and Concrete Composites*, 27(9-10), 910-913.
- Shahidan, S., Azmi, M. A. M., Kupusamy, K., Zuki, S. S. M., & Ali, N. (2017). **Utilizing construction and demolition (C&D) waste as recycled aggregates (RA) in concrete**. *Procedia engineering*, 174, 1028-1035.

- Siddique, R. (2003). **Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the mechanical properties of concrete.** Cement and Concrete research, 33(4), 539-547.
- 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
- Soroushian, P., et al. (1999). **Experimental investigation of the optimized use of plastic flakes in normal-weight concrete.** Magazine of Concrete Research 51.1, 27-33.





ภาคผนวก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Pronpan Choedchai, Somsak Siwadamrongpong, Janjira Aphirakmethawong and Kanchala Sudtachat. (2019). **The Study of Particle Size of Recycled Melamine Waste on Compressive Strength of Lightweight Concrete.** INTERNATIONAL CONGRESS ON RECENT ADVANCES IN SCENCES AND TECHNOLOGY. 20-22 February 2019, Kuala Lumpur, Malaysia.

ชัชพิมุข พรหมโชติ, พรพรรณ เนิตฉาย, กัญชลา สุดตาชาติ, สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ และเฉลิมชัย ไชยธงรัตน์ (Accepted). อิทธิพลขนาดคละของมวลรวมที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดและการชะละลายไอออนของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียเมลามีน. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม - เมษายน 2562.



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวพรพรรณ เจริญชัย เกิดเมื่อวันที่ 6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2538 ศึกษา ชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น และชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนสตรีนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2558 ในระหว่างการศึกษาระดับปริญญาตรีได้สหกิจศึกษา ณ บริษัท เอ็นเอ็มบี-มินิแบ (MinebeaMitsumi, Inc.) ไทย จำกัด ตำแหน่งผู้ช่วยวิศวกร ในแผนก Magnets and Hard Ferrites เป็นเวลา 4 เดือน

ปี พ.ศ. 2559 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา โดยได้รับทุนการศึกษา “OROG” จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขณะที่ศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิตนั้น ได้มีประสบการณ์โดยเป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาดังนี้

- 1) ปฏิบัติการทดสอบวัสดุ(Material and Measurement Laboratory)
- 2) ปฏิบัติการวัดละเอียด (Precision Measurement and Control Laboratory)
- 3) การผลิตโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วย (CAD/CAM)
- 4) ปฏิบัติการทดสอบวัสดุแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing)

ในระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท ได้นำเสนอผลงานทางวิชาการ ตามที่ได้นำเสนอด้งแสดงใน  
ภาคผนวก