

ผลกระทบของเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา



นายเฉลิมชัย ไชยธงรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2559

**INFLUENCE OF MELAMINE FORMALDEHYDE
WASTE ON MECHANICAL PROPERTIES
OF LIGHTWEIGHT CONCRETE**

Chalermchai Chaitongrat



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2016

ผลกระทบบของเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุุญชีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.กิริติ สุลักษณ์)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.ชาญณรงค์ สายแก้ว)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ)

กรรมการ

(อ. ดร.อภิชน วัชรนทร์วงศ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เฉลิมชัย ไชยณรงค์ : ผลกระทบของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ต่อสมบัติเชิงกลของ
คอนกรีตมวลเบา (INFLUENCE OF MELAMINE FORMALDEHYDE WASTE ON
MECHANICAL PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT CONCRETE)

อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์, 192 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส โดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายบางส่วน โดยมีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0 และ 0.5 ตามลำดับ การแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเศษเมลามีนโดยน้ำหนักร้อยละ 15 25 และ 35 ตามลำดับ และการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่การควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเท่ากับ 1,000 1,100 1,200 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และอายุบ่มเท่ากับ 3 7 14 28 และ 60 วัน การศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของงานวิจัยประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของวัสดุยึดประสานและมวลรวมละเอียด อีกทั้งยังศึกษาความหนาแน่นแห้ง กำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ การนำความร้อน ความพรุน โครงสร้างจุลภาคและการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสมเศษเมลามีน

ผลการศึกษาพบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนร้อยละ 25 แสดงกำลังรับแรงอัดสูงสุด และยังพบอีกว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล โดยมี 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ผลการออกแบบการทดลองพบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนส่งผลให้คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีค่าความหนาแน่นแห้งแปรปรวนจากการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเล็กน้อย ขณะเดียวกัน การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนยังส่งผลให้กำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสปกติ ซึ่งการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสปกติ ในส่วนของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนรวมของเพสต์เพิ่มมากขึ้นและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเพสต์ลดลงเมื่อเทียบกับเพสต์ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสปกติ สำหรับการวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคพบว่า เศษเมลามีนในคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีการกระจายตัวได้ดีทั่วทั้งผิวหน้าตัดเรียบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเศษฝุ่นเมลามีนที่สามารถเข้ากันได้เป็นอย่างดีกับซีเมนต์เพสต์ซึ่งดูได้จากความเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างซีเมนต์เพสต์และเศษฝุ่นเมลามีน อีกทั้งการรีไซเคิลเศษเมลามีน โดยใช้แทนที่ทรายบางส่วนในคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสยังสามารถช่วยให้การชะละลาย

สารปนเปื้อนโลหะหนักลดลงได้ เมื่อเทียบกับการชะละลายเศษเมลามีนโดยตรง ซึ่งการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักของเศษเมลามีนในคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์มีค่าไม่เกินมาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

ผลจากการศึกษาครั้งนี้ทำให้ทราบถึงผลกระทบของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ และสามารถใช้เป็นแนวทางในการรีไซเคิลเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ โดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแทนที่ทรายร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีศักยภาพมากพอในการนำไปใช้งานตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ



สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

CHALERMCHAI CHAITONGRAT : INFLUENCE OF MELAMINE
FORMALDEHYDE WASTE ON MECHANICAL PROPERTIES OF
LIGHTWEIGHT CONCRETE. THESIS ADVISOR : SOMSAK
SIWADAMRONGPONG, D.Eng., 192 PP.

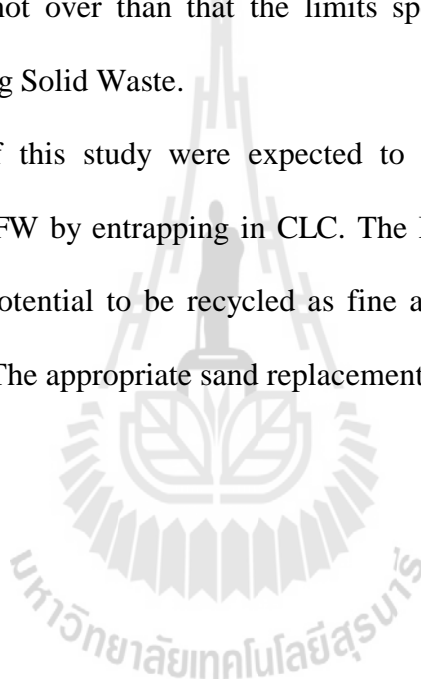
MELAMINE FORMALDEHYDE/ WASTE/ MECHANICAL PROPERTIES/
LIGHTWEIGHT CONCRETE/ RECYCLING

This research presents the influence of melamine formaldehyde waste (MFW) on mechanical properties of cellular lightweight concrete (CLC) as fine aggregate by partially replacing of river sand. The ratios of binder-to-fine aggregate and water-to-binder are 1.0 and 0.5, respectively. The replacements of sand by melamine formaldehyde waste are 15%, 25% and 35%, respectively. The replacement of cement by fly ash is 10% by weight. The densities of fresh CLC are 1000, 1100, 1200, and 1300 kg/m³ at the ages of 3, 7, 14, 28, and 60 days. Physical and mechanical properties of CLC containing MFW were evaluated. Physical property tests included fineness modulus, particle-size distribution and specific gravity, while mechanical property tests included dry density, compressive strength, water absorption, thermal conductivity, porosity, microstructure and heavy metal leaching.

It was found that 25% replacement of MFW yielded the appropriated compressive strength and it was also found that the compressive strength increases with replacing of cement by fly ash of 10%. Then, a full factorial experimental design with center points is used for the analysis, three factors each at two levels. The results indicate that values of dry density were slightly fluctuated from design density for mixtures containing of MFW. The compressive strength of CLC containing MFW is

higher than that of control CLC while the water absorption increases with increasing MFW replacement. The replacing of sand by MFW significantly affect thermal conductivity of CLC compared with the control CLC. The MFW replacement of river sand increases the total pore volume and reduces the average pore diameter of CLC. The recycling of MFW as fine aggregate in CLC could be reduced the heavy metal leaching from the CLC compared to leaching from MFW. The heavy metal leaching from the CLC does not over than that the limits specified by the US EPA, Test Methods for Evaluating Solid Waste.

The results of this study were expected to report the useful finding for recycling scrapped MFW by entrapping in CLC. The MFW from melamine product manufacturing have potential to be recycled as fine aggregate for non-load-bearing lightweight concrete. The appropriate sand replacement ratio should be 25 wt%.



School of Mechanical Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ผู้ให้กำเนิด ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูส่งเสริมให้ได้รับการศึกษาตลอดมา พร้อมทั้งได้อบรมสั่งสอน แนวความคิดและการปฏิบัติตน ทำให้ผู้วิจัยมีวันนี้ได้ รวมถึงหลาย ๆ กำลังใจจากญาติพี่น้องและ ครอบครัวที่เป็นกำลังใจอย่างยิ่ง อีกทั้งผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทุก ๆ ท่าน ที่มีได้เอื้อนาม ทำให้ งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษาให้ความรู้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาในการทำงานวิจัยและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัย มาโดยตลอด พร้อมทั้งขอขอบคุณคณะกรรมการสอบทุกท่าน ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการให้ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นสถาบันการศึกษา ทำให้ผู้วิจัยได้มีโอกาสเข้ามาศึกษา รวมถึงบุคลากร ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์และ เครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัย จนสำเร็จได้ในวันนี้

เฉลิมชัย ไชยธงรัตน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฐ
สารบัญรูป.....	ณ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ธ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย	3
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย.....	4
1.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์.....	7
2.2 คอนกรีตมวลเบา.....	9
2.3 ส่วนประกอบคอนกรีตมวลเบาชนิดเซลลูลาร์.....	11
2.3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	11
2.3.2 ฝ้ายลอย.....	11
2.3.3 มวลรวมละเอียด.....	11
2.3.4 น้ำ.....	12
2.3.5 สารเพิ่มฟองอากาศ.....	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	โครงสร้างโพรงของคอนกรีตมวลเบา	13
2.5	ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
2.5.1	ความหนาแน่น	25
2.5.2	การยุบตัว	26
2.5.3	การหดตัวแห้ง	27
2.5.4	กำลังรับแรงอัด	28
2.5.5	กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก	29
2.5.6	กำลังรับแรงคด	30
2.5.7	มอดูลัสยืดหยุ่น	31
2.5.8	การดูดซึมน้ำ	32
2.5.9	การนำความร้อน	33
2.6	การออกแบบการทดลอง	34
2.6.1	หลักการพื้นฐานในการออกแบบการทดลอง	34
2.6.2	รูปแบบการออกแบบการทดลอง	35
2.6.3	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล แบบ 2^k แฟกทอเรียล	36
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1	วัสดุ (materials)	46
3.1.1	ปูนซีเมนต์	46
3.1.2	เถ้าลอย	46
3.1.3	ทราย	46
3.1.4	เศษเมลามีน	46
3.1.5	น้ำ	46
3.1.6	สารก่อโฟม	46

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	48
3.2.1	เครื่องบดย่อยพลาสติก	48
3.2.2	เครื่องร่อนแยกขนาด	48
3.2.3	เครื่องผสม	49
3.2.4	เครื่องสร้างโฟม	50
3.2.5	เครื่องอัดอากาศ	51
3.2.6	ภาชนะและเครื่องชั่งน้ำหนักคอนกรีตสด	52
3.2.7	แบบหล่อมาตรฐาน	53
3.2.8	เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	54
3.2.9	ตู้อบลมร้อน.....	55
3.2.10	เครื่องทดสอบการนำความร้อน	56
3.3	การทดสอบสมบัติของวัสดุ.....	57
3.3.1	การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ.....	57
3.3.2	การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุ.....	57
3.3.3	การทดสอบค่าความชื้นที่ผิวของวัสดุ	58
3.3.4	การวิเคราะห์ห้ขนาดคละ	58
3.4	การวิเคราะห์ระดับจุลภาค	60
3.4.1	เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค.....	60
3.4.2	เครื่องวิเคราะห์เรย์ฟลูออเรสเซนส์.....	61
3.4.3	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	62
3.4.4	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	64
3.4.5	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	64

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5	การขึ้นรูปขึ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	66
3.5.1	การออกแบบส่วนผสม	66
3.5.2	การเตรียมเศษเมลามีน	67
3.5.3	การเตรียมโฟม	68
3.5.4	การหล่อขึ้นทดสอบ	69
3.5.5	การถอดแบบและการบ่ม	69
3.6	การทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	70
3.6.1	การทดสอบความหนาแน่นแห้ง	70
3.6.2	การทดสอบกำลังรับแรงอัด	70
3.6.3	การทดสอบการดูดซึมน้ำ	71
3.6.4	การทดสอบการนำความร้อน	71
3.6.5	การทดสอบความพรุน	73
3.6.6	การทดสอบการชะละลาย	75
3.7	การวิเคราะห์การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล แบบ 2 ^k แฟกทอเรียล	76
3.8	แผนภาพการดำเนินงานวิจัย	76
4	ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
4.1	สมบัติของวัสดุตีประสานและมวลรวมละเอียด	79
4.1.1	สมบัติทางกายภาพ	79
4.1.2	องค์ประกอบทางเคมี	83
4.2	ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	85
4.3	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	91

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4	ผลวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดของการออกแบบ	
	การทดลองเชิงแฟกทอเรียล	99
4.4.1	การตรวจสอบความถูกต้องของแผนการทดลอง	
	กำลังรับแรงอัด	102
4.4.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังรับแรงอัด	
	ของคอนกรีตมวลเบา	104
4.4.3	การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยของกำลังรับแรงอัด	
	ของคอนกรีตมวลเบา	111
4.4.4	การกำหนดระดับของปัจจัยเพื่อทำนายค่ากำลังรับแรงอัด	
	ของคอนกรีตมวลเบา	113
4.4.5	การทดสอบยืนยันผลการทำนายค่ากำลังรับแรงอัด	113
4.5	การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	115
4.6	ผลวิเคราะห์การดูดซึมน้ำของการออกแบบ	
	การทดลองเชิงแฟกทอเรียล	121
4.6.1	การตรวจสอบความถูกต้องของแผนการทดลอง	
	การดูดซึมน้ำ	122
4.6.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการดูดซึมน้ำ	
	ของคอนกรีตมวลเบา	124
4.6.3	การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยของการดูดซึมน้ำ	
	ของคอนกรีตมวลเบา	129
4.6.4	การกำหนดระดับของปัจจัยเพื่อทำนายค่าการดูดซึมน้ำ	
	ของคอนกรีตมวลเบา	130
4.6.5	การทดสอบยืนยันผลการทำนายค่าการดูดซึมน้ำ	130
4.7	การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	132

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.8	ผลวิเคราะห์การนำความร้อนของการออกแบบ การทดลองเชิงแฟกทอเรียล	137
4.8.1	การตรวจสอบความถูกต้องของแผนการทดลอง การนำความร้อน.....	138
4.8.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการนำความร้อน ของคอนกรีตมวลเบา	140
4.8.3	การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยของการนำความร้อน ของคอนกรีตมวลเบา	144
4.8.4	การกำหนดระดับของปัจจัยเพื่อทำนายค่าการนำความร้อน ของคอนกรีตมวลเบา	145
4.8.5	การทดสอบยืนยันผลการทำนายค่าการนำความร้อน.....	145
4.9	การกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง	147
4.10	ความพรุนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์.....	150
4.11	การวิเคราะห์ภาพถ่ายจุลทรรศน์ออปติคัล ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	156
4.12	การวิเคราะห์ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	162
4.13	การชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนัก ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	164

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1	ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	165
5.2	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	166
5.3	การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	167
5.4	การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	167
5.5	ความพรุนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	168
5.6	โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	168
5.7	การชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนัก ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	168
5.8	ข้อเสนอแนะ	169
	รายการอ้างอิง	170
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	176
	ประวัติผู้เขียน	191

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สมบัติทางกลและทางกายภาพของเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์..... 9
2.2	การแทนที่มวลรวมธรรมชาติด้วยมวลรวมพลาสติก ในซีเมนต์มอร์ตาร์/คอนกรีต..... 23
2.3	สมบัติทางกลของคอนกรีตที่ได้รายงานในวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง..... 24
2.4	แสดงการออกแบบการทดลองที่ 2 ปัจจัยในระดับสูงและต่ำ..... 37
2.5	การออกแบบการทดลองที่ 2 ปัจจัยในระดับสูงและต่ำ..... 40
3.1	สัดส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์..... 66
3.2	ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัย..... 76
4.1	สมบัติทางกายภาพของวัสดุยึดประสานและมวลรวมละเอียด..... 79
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย..... 84
4.3	ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์..... 85
4.4	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์..... 91
4.5	ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัย..... 99
4.6	ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ ที่มีการทดลองซ้ำ 5 ซ้ำ และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย ของการทดสอบกำลังรับแรงอัด ของคอนกรีตมวลเบา..... 100
4.7	การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัยในการทดสอบกำลังรับแรงอัด ของคอนกรีตมวลเบา..... 104
4.8	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย ในการทดสอบ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา..... 104
4.9	การกำหนดระดับของปัจจัยเพื่อทำนายค่ากำลังรับแรงอัด ของคอนกรีตมวลเบา..... 113
4.10	การกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง..... 113

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 ผลเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน ของผลทำนายและผลการทดสอบจริง.....	114
4.12 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์.....	115
4.13 ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ ที่มีการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย ของการทดสอบการดูดซึมน้ำ ของคอนกรีตมวลเบา.....	121
4.14 การวิเคราะห์หัตถิพลของปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2 ³ แฟกทอเรียล และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย ในการทดสอบการดูดซึมน้ำ ของคอนกรีตมวลเบา.....	124
4.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแผนการทดลองแบบ 2 ³ แฟกทอเรียล และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย ในการทดสอบ การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา.....	124
4.16 การกำหนดระดับของปัจจัยเพื่อทำนายค่าการดูดซึมน้ำ ของคอนกรีตมวลเบา.....	130
4.17 การกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง.....	130
4.18 ผลเปรียบเทียบค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน ของผลทำนายและผลการทดสอบจริง.....	131
4.19 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์.....	132
4.20 ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ ที่มีการทดลองซ้ำ 2 ซ้ำ และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย ของการทดสอบการนำความร้อน ของคอนกรีตมวลเบา.....	137
4.21 การวิเคราะห์หัตถิพลของปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2 ³ แฟกทอเรียล และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย ในการทดสอบการนำความร้อน ของคอนกรีตมวลเบา.....	140

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.22 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแผนการทดลองแบบ 2 ³ แฟกทอเรียล และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย ในการทดสอบ การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา.....	140
4.23 การกำหนดระดับของปัจจัยเพื่อทำนายค่าการนำความร้อน ของคอนกรีตมวลเบา.....	145
4.24 การกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง.....	145
4.25 ผลเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน ของผลทำนายและผลการทดสอบจริง.....	146
4.26 การกำหนดวัตถุประสงค์ของผลตอบสนองหลายตัว.....	147
4.27 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา ที่รหัสผสม MFG25FA10D13.....	148
4.28 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา ที่รหัสผสม MFG25FA10D13.....	148
4.29 ผลการทดสอบเพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือ ของการวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสม.....	149
4.30 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส กับงานวิจัยต่างประเทศ.....	149
4.31 ความพรุนของวัสดุมวลรวมละเอียดและคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส.....	150
4.32 ปริมาตรรูพรุนรวมและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส.....	154
4.33 การชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักคอนกรีตมวลเบา.....	164
4.34 ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว.....	164

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	สูตร โครงสร้างเคมีของเมลามีน.....	7
2.2	ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างเมลามีนกับฟอร์มัลดีไฮด์	8
2.3	ภาพพื้นผิวที่ขัดเรียบของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	11
2.4	โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์	13
2.5	ความหนาแน่นของคอนกรีตผสมเศษขวด PET	25
2.6	ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเศษพลาสติก	26
2.7	ค่าการหดตัวแห้งของคอนกรีตผสมเศษเส้นใยพลาสติก	27
2.8	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเศษขวด PET	28
2.9	กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเศษขวด PET	29
2.10	กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตผสมเศษขวด PET	30
2.11	มอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเศษขวด PET	31
2.12	การดูดซึมน้ำของคอนกรีตผสมเศษขวด PET	32
2.13	การนำความร้อนของคอนกรีตผสมเศษเม็ดโพลีโพลีสไตรีน	33
2.14	รูปแบบของการออกแบบการทดลอง.....	35
2.15	แสดงการทดลองร่วมปัจจัยของการออกแบบ 2 ² แฟกทอเรียล	37
3.1	เศษเมลามีนที่ใช้ในงานวิจัย.....	47
3.2	เครื่องบดย่อยเศษกริบเมลามีนและเครื่องร่อนเศษฝุ่นเมลามีน.....	48
3.3	เครื่องผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์	49
3.4	เครื่องสร้างโฟม	50
3.5	เครื่องอัดอากาศที่ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดโฟม	51
3.6	ภาชนะและเครื่องชั่งน้ำหนักคอนกรีตสด	52
3.7	แบบหล่อคอนกรีตมวลเบามาตรฐาน	53
3.8	เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด	54
3.9	ตู้อบลมร้อน	55
3.10	เครื่องทดสอบการนำความร้อน	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11	แผนภาพแสดงขนาดคละของมวลรวม..... 59
3.12	เครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค 60
3.13	เครื่องวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบธาตุ (XRF) 61
3.14	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกเมลามีนบริสุทธิ์ 63
3.15	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM)..... 64
3.16	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) 65
3.17	เศษเม็ดเมลามีนและเศษฝุ่นเมลามีน 67
3.18	การผสมโฟมในคอนกรีตมวลเบาแบบ pre-formed foam method..... 68
3.19	การหล่อขึ้นทดสอบ..... 69
3.20	การดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนผิวและภายในรูพรุนของวัสดุ..... 73
3.21	เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก ICP..... 75
3.22	แผนการดำเนินงานวิจัย 77
4.1	การกระจายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ เถ้าลอยและเศษฝุ่นเมลามีน 80
4.2	แสดงขนาดส่วนคละของทรายและเศษเม็ดเมลามีน..... 81
4.3	ภาพขยายของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยด้วยกล้อง SEM..... 81
4.4	ภาพขยายของทราย เศษเม็ดและเศษฝุ่นเมลามีนด้วยกล้อง SEM..... 82
4.5	ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ที่ 1,000 กก./ม. ³ 86
4.6	ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ที่ 1,300 กก./ม. ³ 87
4.7	หนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ที่ 1,100 กก./ม. ³ 88
4.8	ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ที่ 1,300 กก./ม. ³ 89
4.9	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ผสมเศษเมลามีน (ซ้าย) เม็ด (ขวา) ฝุ่น ความหนาแน่น 1,000 กก./ม. ³ 92
4.10	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ผสมเศษเมลามีน (ซ้าย) เม็ด (ขวา) ฝุ่น ความหนาแน่น 1,300 กก./ม. ³ 93
4.11	การรวมกันระหว่างมวลรวมละเอียดทรายแม่น้ำและเศษเมลามีน 95

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนร้อยละ 25 (ซ้าย) เม็ด (ขวา) ฝุ่น ความหนาแน่น 1,100 กก./ม. ³ 96
4.13	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนร้อยละ 25 (ซ้าย) เม็ด (ขวา) ฝุ่น ความหนาแน่น 1,300 กก./ม. ³ 97
4.14	ทริทเมนต์คอมบิเนชั่นของแผนการทดลองแบบ 2 ³ แฟกทอเรียล ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา 101
4.15	การตรวจสอบความถูกต้องของแผนการทดลองกำลังรับแรงอัด..... 103
4.16	ความน่าจะเป็นแบบปกติของตัวประมาณของอิทธิพล ทั้งหมดของกำลังรับแรงอัด..... 105
4.17	การประมาณอิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลอง 2 ³ แฟกทอเรียล ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา 106
4.18	การประมาณอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของแผนการทดลอง 2 ³ แฟกทอเรียล ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา 107
4.19	โครงร่างระหว่าง ปัจจัยเศษเมลามีน (A) และความหนาแน่น (C)..... 108
4.20	พื้นผิวตอบสนองระหว่าง ปัจจัยเศษเมลามีน (A) และความหนาแน่น (C) 109
4.21	โครงร่างระหว่าง ปัจจัยเถ้าลอย (B) และความหนาแน่น (C)..... 110
4.22	พื้นผิวตอบสนองระหว่าง ปัจจัยเถ้าลอย (B) และความหนาแน่น (C)..... 111
4.23	ผลเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา อายุ 28 วัน ของผลทำนายและผลการทดสอบจริง 114
4.24	การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ความหนาแน่น 1,000 กก./ม. ³ 116
4.25	การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ความหนาแน่น 1,300 กก./ม. ³ 117
4.26	การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ความหนาแน่น 1,100 กก./ม. ³ 119

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27	การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ความหนาแน่น 1,300 กก./ม. ³ 120
4.28	ทริทเมนต์คอมบิเนชันของแผนการทดลองแบบ 2 ³ แฟกทอเรียล ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา..... 122
4.29	การตรวจสอบความถูกต้องของแผนการทดลองการดูดซึมน้ำ..... 123
4.30	ความน่าจะเป็นแบบปกติตัวประมาณของอิทธิพลทั้งหมดของการดูดซึมน้ำ..... 125
4.31	การประมาณอิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลอง 2 ³ แฟกทอเรียล ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา..... 126
4.32	การประมาณอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของแผนการทดลอง 2 ³ แฟกทอเรียล ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา..... 127
4.33	โครงสร้างระหว่าง ปัจจัยเศษเมลามีน (A) และความหนาแน่น (C)..... 128
4.34	พื้นผิวตอบสนองระหว่าง ปัจจัยเศษเมลามีน (A) และความหนาแน่น (C) 129
4.35	ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน ของผลทำนายและผลการทดสอบจริง..... 131
4.36	การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ความหนาแน่น 1,000 กก./ม. ³ 133
4.37	การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ความหนาแน่น 1,300 กก./ม. ³ 134
4.38	การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ความหนาแน่น 1,100 กก./ม. ³ 135
4.39	การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ความหนาแน่น 1,300 กก./ม. ³ 136
4.40	ทริทเมนต์คอมบิเนชันของแผนการทดลองแบบ 2 ³ แฟกทอเรียล ในการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา..... 138
4.41	การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองของนำความร้อน..... 139

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.42	ความน่าจะเป็นแบบปกติของตัวประมาณอิทธิพลของการนำความร้อน 141
4.43	การประมาณอิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลอง 2 ³ แฟกทอเรียล ในการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา..... 142
4.44	การประมาณอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของแผนการทดลอง 2 ³ แฟกทอเรียลในการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา 143
4.45	ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวล เบาอายุ 28 วันของผลทำนายและผลการทดสอบจริง 146
4.46	ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับผลตอบสนองหลายตัว 147
4.47	พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุมวลรวมละเอียดและคอนกรีตมวลเบา ความหนาแน่น 1,100 1,200 และ 1,300 กก./ม. ³ 151
4.48	ปริมาตรรูพรุนรวมของวัสดุมวลรวมละเอียดและคอนกรีตมวลเบา ความหนาแน่น 1,100 1,200 และ 1,300 กก./ม. ³ 152
4.49	ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของวัสดุมวลรวมละเอียดและคอนกรีตมวลเบา ความหนาแน่น 1,100 1,200 และ 1,300 กก./ม. ³ 153
4.50	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรูพรุนรวมและการดูดซึมน้ำ ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์อายุ 28 วัน..... 155
4.51	ภาพ OM ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ความหนาแน่น 1,100 กก./ม. ³ 157
4.52	ภาพ OM ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ความหนาแน่น 1,200 และ 1,300 กก./ม. ³ 158
4.53	ภาพ OM ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ความหนาแน่น 1,100 กก./ม. ³ 160
4.54	ภาพ OM ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ความหนาแน่น 1,300 และ 1,300 กก./ม. ³ 161
4.55	ภาพ SEM ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ความหนาแน่น 1,100 กก./ม. ³ 163

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Al_2O_3	อะลูมิเนียมออกไซด์หรืออลูมินา
ANOVA	analysis of variance
ASTM	American society for testing and materials
β	สัมประสิทธิ์การหดถอย
BET	Brunauer-Emmett-Teller
CaO	แคลเซียมออกไซด์
C_3A	ไตรแคลเซียมอลูมิเนต
C_4AF	เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์
$\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$	เมลามีน
CH_2O	ฟอร์มัลดีไฮด์
CO_2	คาร์บอนไดออกไซด์
C_2S	ไดแคลเซียมซิลิเกต
C_3S	ไตรแคลเซียมซิลิเกต
DOE	design of experiment
FA	fly ash
Fe_2O_3	เฟอร์ริกออกไซด์
HNCO	กรดไซยานิก
H_2O	น้ำ
ICP	inductively coupled plasma spectroscope
K_2O	โพแทสเซียมออกไซด์
MF	melamine formaldehyde
MFG	melamine formaldehyde waste granule
MFP	melamine formaldehyde waste powder
MFW	melamine formaldehyde waste
MgO	แมกนีเซียมออกไซด์
MPa	mega Pascal ($1 \text{ MPa} = \times 10^6 \text{ N/m}^2$)
MS	mean squares

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Na ₂ O	โซเดียมออกไซด์
NH ₃	แอมโมเนีย
(NH ₂) ₂ CO	ยูเรีย
OM	optical microscope
OPC	ordinary Portland cement
P_s	ความชื้นที่ผิวของวัสดุทดสอบ อิมตัวผิวแห้ง
PET	polyethylene terephthalate
R_{adj}^2	adjusted coefficient of determination
SEM	scanning electron microscope
S_g	ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ
SiO ₂	ซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกา
SO ₃	ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์
SS	sum of squares
SS _T	total sum of squares
TiO ₂	ไทเทเนียมออกไซด์
μm	micrometer หรือ micron (1 micron = 1×10 ⁻⁶ m)
W	Watt
w/b	Water-to-binder ratio
w/c	Water-to-cement ratio
W/m. °C	Watt per meter–Degree Celsius
W/m. K	Watt per meter–Kelvin
W_a	การดูดซึมน้ำ
W_d	น้ำหนักของชิ้นทดสอบเมื่อแห้ง
W_w	น้ำหนักของชิ้นทดสอบเมื่อเปียก
XRD	x-ray diffraction
XRF	x-ray fluorescence

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากมุมมองทางประวัติศาสตร์ การพัฒนาของพลาสติกถือได้ว่าเป็นหนึ่งในความสำเร็จทางเทคนิคที่สำคัญที่สุดของศตวรรษที่ 20 ในเวลาเพียง 60 ปี พลาสติกได้เติมเต็มแทบทุกแง่มุมของชีวิตประจำวัน พร้อมทั้งปูทางสำหรับสิ่งประดิษฐ์ใหม่และแทนที่วัสดุในผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่ เนื่องจากพลาสติกมีน้ำหนักเบา มีความทนทาน มีการใช้งานที่หลากหลาย และความสามารถในการขึ้นรูปตามแบบที่ต้องการ ส่งผลให้การผลิตพลาสติกทั่วโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จาก 1.5 ล้านตัน ในปี 1950 เป็น 299 ล้านตัน ในปี 2013 ซึ่งการเจริญเติบโตโดยเฉลี่ยในแต่ละปีประมาณร้อยละ 4-5 ในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา (Visvanathan and Trankler, 2004)

การจัดการขยะพลาสติกเป็นหนึ่งในความกังวลด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญในโลก พลาสติกสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภท ประเภทแรกคือ เทอร์โมพลาสติก (thermoplastics) พลาสติกประเภทนี้มีโครงสร้างแบบเส้นหรือแบบกิ่งสั้น ๆ เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวและหลอมเหลวเป็นของเหลวหนืด (viscous liquid) พลาสติกประเภทนี้สามารถนำกลับมารีไซเคิล (recycle) ได้ง่าย เพราะเมื่อให้ความร้อนอีกครั้งจะสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างใหม่ได้ พลาสติกประเภทนี้ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิเอสเตอร์ เป็นต้น ประเภทที่สองคือ เทอร์โมเซตติง (thermosetting plastics) พลาสติกประเภทนี้สามารถหลอมเหลวได้ในขั้นตอนแรกเท่านั้น เมื่อเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลจนได้เป็นพลาสติกแบบร่างแหหรือแบบสามมิติแล้ว จะไม่สามารถอ่อนตัวหรือหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน แต่ถ้าได้รับความร้อนสูงมาก ๆ จะทำให้พันธะที่ยึดอะตอมไว้ภายในโมเลกุลแตกออก พลาสติกเกิดการสลายตัว (decompose or degrade) จึงเป็นพลาสติกที่ไม่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้อีก พลาสติกประเภทนี้ได้แก่ พอลิยูรีเทน อีพอกซี ฟีนอลิก เมลามีน เป็นต้น ปัจจุบันพลาสติกประเภทนี้มีการกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ (landfill) ซึ่งวิธีนี้เื้อต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากอัตราการย่อยสลายช้า อีกทั้งขยะพลาสติกอาจชะล้างสารพิษของน้ำ ทำให้อัตราการแทรกซึมของน้ำฝนลดลง ส่งผลให้ความอุดมสมบูรณ์ของดินเสื่อมสภาพลง และยังสามารถชะล้างสารเคลื่อนที่ของรากต้นไม้ นอกจากนี้ขยะพลาสติกยังมีองค์ประกอบที่เป็นพิษต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแคดเมียมและตะกั่ว ซึ่งสามารถผสมกับน้ำฝนและก่อให้เกิดมลพิษในดินและน้ำได้ ขณะที่ขยะพลาสติกที่ไหลลงแม่น้ำ

ลำธารหรือทะเลจะทำให้น้ำปนเปื้อนส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตทางทะเลหรือสัตว์น้ำได้ โดยสัตว์น้ำเหล่านั้นจะกลืนกินขยะพลาสติกเข้าไป ซึ่งขยะพลาสติกเหล่านั้นสามารถทำลายสุขภาพของสัตว์น้ำได้ สังเกตได้จากการพบขยะพลาสติกในท้องหรือกล้ามเนื้อของสัตว์น้ำเหล่านั้น อีกทั้งวิธีการฝังกลบยังเป็นวิธีการที่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ซึ่งหากเราสามารถนำขยะพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงกลับมาใช้ใหม่ได้ เราจะสามารถลดมลพิษที่เกิดจากการฝังกลบขยะพลาสติก รวมทั้งยังสามารถลดค่าใช้จ่ายที่ใช้ไปในกระบวนการฝังกลบได้

การรีไซเคิลขยะพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงโดยใช้เป็นวัสดุผสมในวัสดุก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คอนกรีตมวลเบา (lightweight concrete) ที่ใช้เป็นผนังทั้งภายในและภายนอกของอาคาร ที่ต้องการวัสดุมวลรวมที่มีน้ำหนักเบา ทำให้ขยะพลาสติกจึงเป็นทางเลือกที่เป็นไปได้ที่จะสามารถลดน้ำหนักของคอนกรีตและทำให้โครงสร้างของอาคารมีขนาดลดลง ซึ่งการรีไซเคิลขยะพลาสติกด้วยวิธีการนี้เป็นหนึ่งในการแก้ปัญหาที่ดีที่สุด สำหรับการกำจัดขยะพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติง เนื่องจากข้อได้เปรียบทางเศรษฐศาสตร์และนิเวศวิทยา

ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงนำมาสู่แนวความคิดในการศึกษาผลกระทบของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ โดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายบางส่วน พร้อมทั้งศึกษาความเป็นไปได้ในการรีไซเคิลเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ซึ่งเป็นเทอร์โมเซตติงพลาสติกที่ใช้ในการผลิตภาชนะในครัวเรือนและมีปริมาณการใช้งานเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะนำไปสู่การใช้งานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ ศึกษาผลกระทบของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ โดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายบางส่วน โดยแบ่งเป็นวัตถุประสงค์ย่อยดังนี้

- 1) เพื่อเปรียบเทียบการพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์กับคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ทั่วไป
- 2) เพื่อหาปริมาณสัดส่วนผสมที่เหมาะสมในการใช้เศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์แทนที่ทรายบางส่วนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
- 3) เพื่อศึกษาแนวทางการนำไปใช้งานของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาผลกระทบของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส โดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายบางส่วน เศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่ใช้ในงานวิจัยแตกต่างกัน 2 แบบ คือ แบบเม็ดและแบบฝุ่น โดยมีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 และ 0.5 ตามลำดับ การแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเศษเมลามีนโดยน้ำหนักร้อยละ 15 25 และ 35 ตามลำดับ และการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่การควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเท่ากับ 1,000 1,100 1,200 และ 1,300 กก./ม.³ และอายุบ่มเท่ากับ 3 7 14 28 และ 60 วัน

การศึกษสมบัติต่าง ๆ ของงานวิจัยประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุยึดประสานและมวลรวมละเอียด อีกทั้งยังศึกษาความหนาแน่นแห้ง กำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ การนำความร้อน ความพรุน โครงสร้างจุลภาคและการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสมเศษเมลามีน

1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

- 1) สืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) ออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k factorial design)
- 3) การเตรียมวัสดุสำหรับผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส
 - ทำการบดเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เพื่อให้ได้เศษเมลามีนแบบเม็ด
 - ทำการร่อนเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์โดยตะแกรงร่อนเพื่อให้ได้เศษเมลามีนแบบฝุ่น
- 4) การทดสอบสมบัติของวัสดุยึดประสานและมวลรวมละเอียด
 - สมบัติทางกายภาพ
 - สมบัติทางเคมี
- 5) การขึ้นรูปขึ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส
 - 50 x 50 x 50 มม. สำหรับขึ้นทดสอบกำลังรับแรงอัด
 - 100 x 100 x 100 มม. สำหรับขึ้นทดสอบการดูดซึมน้ำ
 - Ø69 x 75 มม. สำหรับขึ้นทดสอบการนำความร้อน
- 6) การทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส
 - ทดสอบความหนาแน่นแห้ง
 - ทดสอบกำลังรับแรงอัด
 - ทดสอบการดูดซึมน้ำ
 - ทดสอบการนำความร้อน

- ทดสอบความพรุน
 - ทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาค
 - ทดสอบการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนัก
- 7) การวิเคราะห์ผลของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล
- วิเคราะห์ผลทดสอบกำลังรับแรงอัด
 - วิเคราะห์ผลทดสอบการดูดซึมน้ำ
 - วิเคราะห์ผลทดสอบการนำความร้อน
- 8) วิจารณ์และสรุปผลการวิจัย
- 9) เผยแพร่ตีพิมพ์งานวิจัย

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

- 1) อาคารศูนย์เครื่องมือและวิทยาศาสตร์ 4 5 และ 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 2) บริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน)

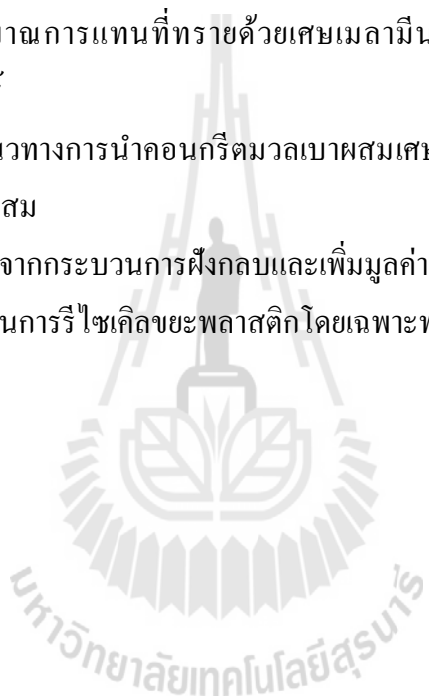
1.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) เครื่องมือสำหรับเตรียมวัสดุ
 - เครื่องบดย่อยพลาสติก (plastic recycling machinery) รุ่น DK-5953
 - เครื่องร่อนแยกขนาด (sieve shaker) ยี่ห้อ Retsch รุ่น AS200
 - ชุดตะแกรงร่อน (sieve) ตามมาตรฐาน ASTM E11
 - เครื่องอบลมร้อน (hot air oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น BE-200
 - เครื่องชั่งดิจิทัล
- 2) เครื่องมือสำหรับขึ้นรูปชิ้นทดสอบ
 - แบบหล่อมาตรฐาน
 - เครื่องผสม (mixer) แบบไม่ผสมเชิง
 - เครื่องสร้างโฟม (foam generator)
 - เครื่องอัดอากาศ (air compressor)
- 3) เครื่องมือสำหรับทดสอบสมบัติคอนกรีตมวลเบา
 - เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (compression machines) รุ่น ELE กำลังสูงสุด 200 ตัน
 - เครื่องทดสอบการนำความร้อน
- 4) เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ระดับจุลภาค
 - เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (laser particle size analysis)

- เครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (x-ray fluorescence; XRF)
- เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (x-ray diffraction; XRD)
- กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (optical microscope; OM)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM)

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เข้าใจถึงอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ในการแทนที่ทรายบางส่วน
- 2) ทราบถึงปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่เหมาะสม ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
- 3) สามารถหาแนวทางการนำคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ไปใช้งานได้ อย่างถูกต้องและเหมาะสม
- 4) ช่วยลดมลพิษจากกระบวนการฝังกลบและเพิ่มมูลค่าเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์
- 5) เป็นแนวทางในการรีไซเคิลขยะพลาสติก โดยเฉพาะพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติง



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของการรีไซเคิลขยะพลาสติก โดยใช้เป็นวัสดุผสมในวัสดุก่อสร้าง ซึ่งแบ่งออกเป็นหกส่วนหลัก ๆ ดังนี้ ส่วนแรกเป็นการอธิบายถึงข้อมูลและคุณสมบัติเบื้องต้นของพลาสติกเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ ซึ่งเป็นวัสดุสำคัญในงานวิจัยครั้งนี้ ส่วนที่สอง สามและสี่ เป็นการอธิบายถึงประเภทของคอนกรีตมวลเบา ส่วนประกอบต่าง ๆ ของคอนกรีตมวลเบาชนิดเซลลูโลส รวมทั้งหน้าที่และชนิดของโพรงในคอนกรีต ส่วนที่ห้าเป็นการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของการรีไซเคิลขยะพลาสติกโดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมในซีเมนต์มอร์ตาร์และคอนกรีต และในส่วนสุดท้ายอธิบายถึงทฤษฎีการออกแบบการทดลองที่ใช้สำหรับการหาปริมาณสัดส่วนที่เหมาะสมในการรีไซเคิลเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ โดยการแทนที่ทรายบางส่วนในคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส ซึ่งสามารถเขียนเป็นหัวข้อได้ดังนี้

- 2.1 เมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์
- 2.2 คอนกรีตมวลเบา
- 2.3 ส่วนประกอบคอนกรีตมวลเบาชนิดเซลลูโลส
- 2.4 โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลเบา
- 2.5 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2.6 การออกแบบการทดลอง

2.1 เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์

สารเมลามีนถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1834 โดยนักเคมีชาวเยอรมันชื่อ Justus von Liebig โดยการเปลี่ยนแคลเซียมไซยานามัยเป็นไดไซยานามัย โดยการให้ความร้อนจนละลายได้เป็นเมลามีน แอมโมเนียและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ปัจจุบันการผลิตเมลามีนส่วนใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตจากยูเรีย ((NH₂)₂CO) ปฏิกิริยาการผลิตเมลามีนจากยูเรียแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้ (สุชน เกลียรยานนท์, 2551)

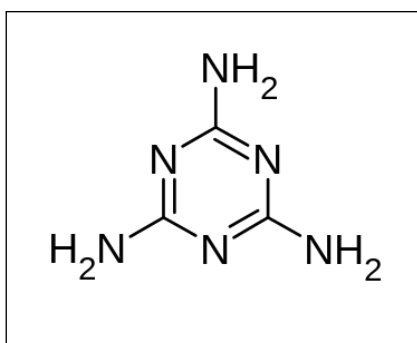
1) ปฏิกิริยาการสลายตัวของยูเรีย ((NH₂)₂CO) ได้เป็นกรดไซยานิก (HNCO) และแอมโมเนีย (NH₃) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic reaction) แสดงดังสมการที่ 2.1



2) ปฏิกิริยาการสลายตัวของกรดไซยานิก (HNCO) ได้เป็นเมลามีน (C₃H₆N₆) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) แสดงดังสมการที่ 2.2

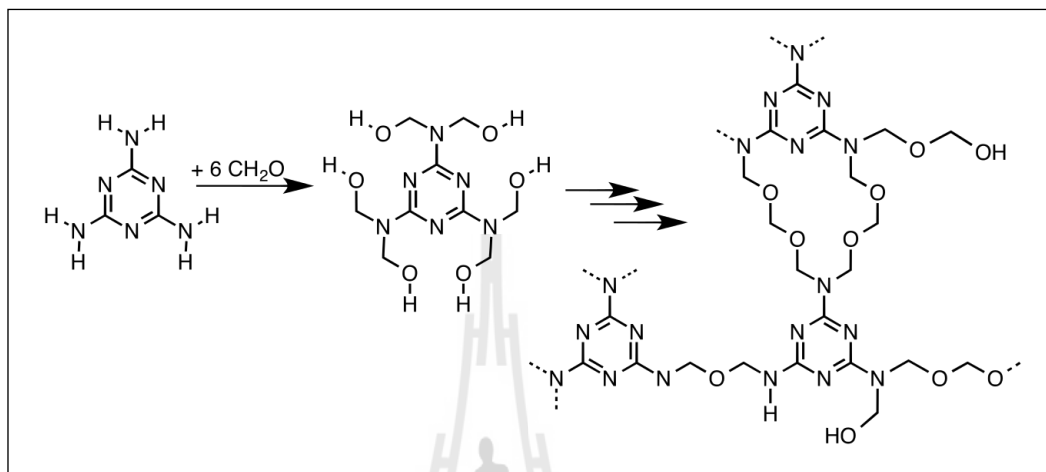


เมลามีนเป็นสารอินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 126.12 กรัม/โมล ความหนาแน่นเท่ากับ 1,574 กก./ม.³ จุดหลอมเหลวอยู่ที่ 345 องศาเซลเซียส ความสามารถในการละลายน้ำเท่ากับ 3.1 กรัม/ลิตร มีสูตรเคมีคือ C₃H₆N₆ ชื่อทางเคมีคือ 1, 3, 5-triazine-2, 4, 6-triamine สำหรับโครงสร้างทางเคมีประกอบด้วย 1 เบนซีนริงและมี NH₂ group 3 ตัว แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สูตร โครงสร้างเคมีของเมลามีน (<https://th.wikipedia.org/wiki/เมลามีน>)

เมลามีนสามารถทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น (condensation polymerization) กับฟอร์มัลดีไฮด์ (CH_2O) ได้เป็นเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (melamine formaldehyde) และน้ำ (H_2O) แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างเมลามีนกับฟอร์มัลดีไฮด์

(https://en.wikipedia.org/wiki/Melamine_resin)

เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (melamine formaldehyde; MF) หรือที่เรียกว่า เมลามีนเรซิน (melamine resin) เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซต (thermosetting plastic) โดยทั่วไปเมลามีนเรซินที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ นอกจากจะมีส่วนประกอบของเมลามีนและฟอร์มัลดีไฮด์แล้ว ยังมีส่วนประกอบของแอลฟาเซลลูโลส (alpha cellulose) เพื่อลดการหดตัว (shrinkage) และการแตกร้าว (crack) ของผลิตภัณฑ์ เมลามีนเรซินเหมาะสำหรับการขึ้นรูปในแม่พิมพ์โดยการให้ความร้อนประมาณ 145-165 องศาเซลเซียส และความดันประมาณ 30-60 เมกะปาสกาล (Dweik et al, 2008) เพื่อทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (cross link) โดยสมบูรณ์ ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นโครงข่ายร่างแหหนาแน่น ซึ่งโครงสร้างลักษณะดังกล่าวส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ที่มีความแข็งแรงสูง เหนียวไม่แตกง่าย ทนทานต่อการขีดข่วน ทนทานต่อน้ำยาฟอกสี เป็นฉนวนไฟฟ้า ไม่ติดไฟ ไม่อ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน เมื่อถูกความร้อนสูงจะไหม้เกรียม จึงทำให้ไม่สามารถหลอมละลายโดยการให้ความร้อนได้อีกเมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้ว ผลิตภัณฑ์จากเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์บรรจุกาอาหาร ได้แก่ จาน ชาม แก้วน้ำ ถ้วยกาแฟ เครื่องใช้ภายในครัว เป็นต้น สมบัติทางกลและทางกายภาพของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกลและทางกายภาพของเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ (Panyakapo et al, 2008)

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
การนำความร้อน (thermal conductivity), W/m.K	0.27-0.42

2.2 คอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบา (lightweight concrete) โดยนิยามหมายถึง คอนกรีตที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยทั่วไปคอนกรีตธรรมดามีความหนาแน่นอยู่ที่ประมาณ 2,240-2,480 กก./ม.³ ในขณะที่คอนกรีตมวลเบามีความหนาแน่นระหว่าง 300-1,680 กก./ม.³ (คำภีร์ จิตรชัยภูมิ, 2556) คอนกรีตมวลเบาสามารถทำได้โดยการแทนที่วัสดุที่มีความหนาแน่นสูงด้วยวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ (ความพรุนสูง) หรือการแทนที่เนื้อคอนกรีตบางส่วนด้วยฟองอากาศ ถ้าหากแบ่งคอนกรีตมวลเบาตามประเภทของวัสดุที่ใช้ในการผลิตสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ๆ ดังนี้

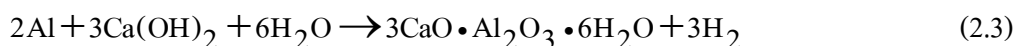
1) คอนกรีตไม่มีมวลรวมละเอียด (no-fine aggregate concrete) คือ คอนกรีตที่มีแต่มวลรวมหยาบที่มีขนาดใกล้เคียงกันหรือขนาดเดียว (single size) คอนกรีตชนิดนี้มีการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และน้ำที่ต่ำ ดังนั้นช่องว่างขนาดเล็กที่อยู่ระหว่างมวลรวมหยาบจึงมีจำนวนมาก คอนกรีตประเภทนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าคอนกรีตพรุน (porous concrete)

2) คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบา (lightweight aggregate concrete) คือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมพรุนที่มีน้ำหนักเบา โดยค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมพรุนมีค่าต่ำกว่ามวลรวมปกติ

3) คอนกรีตที่เกิดจากการเติมฟองอากาศ (aerated concrete) คือคอนกรีตที่ทำให้เกิดโพรงหรือช่องว่าง (void) โดยการกักกระจายฟองอากาศ (air entrainment) ขนาดเล็กภายในเนื้อคอนกรีต คอนกรีตมวลเบาประเภทสามารถแบ่งได้ตามลักษณะของการผลิตฟองอากาศออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

แบบที่หนึ่ง เป็นกระบวนการผลิตฟองอากาศโดยใช้ผงอลูมิเนียมออกไซด์ ถูกคิดค้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1914 โดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีของผงอะลูมิเนียมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งได้มาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ จนเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนขนาดเล็กละเอียดขึ้นในเนื้อคอนกรีต ทำให้เกิดการขยายตัวและมีปริมาตรเพิ่มขึ้น เมื่อคอนกรีตแข็งตัวจะได้คอนกรีต

ที่มีรูพรุนสูงและน้ำหนักเบา แสดงดังสมการที่ 2.3

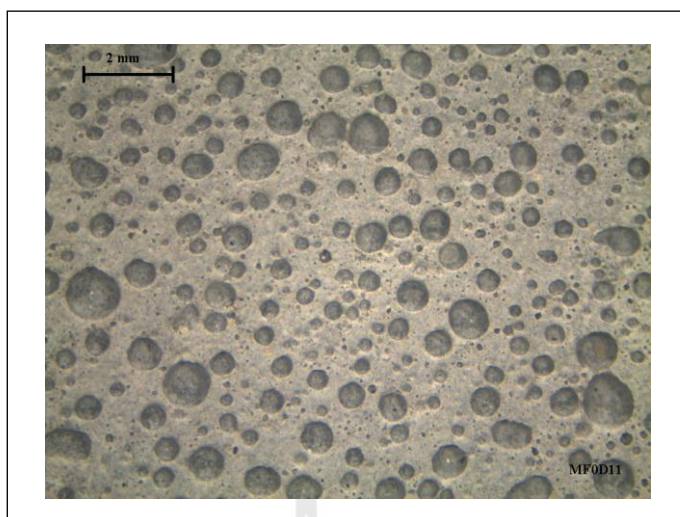


วิธีนี้ถึงแม้จะเป็นเทคโนโลยีเก่า แต่ปัจจุบันก็ยังมีการใช้อยู่ทั่วไป อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตฟองอากาศแบบนี้มีข้อด้อยคือ ต้องอาศัยพลังงานสูงโดยการบ่มด้วยความร้อนและความดัน (autoclave curing) เพื่อเป็นการเร่งปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาเคมีที่ต้องอาศัยการเกิดของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮดรชันก่อน เมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณเพียงพอจึงจะทำปฏิกิริยากับอลูมินัมออกไซด์ จนเกิดเป็นฟองแก๊สไฮโดรเจน

แบบที่สอง เป็นกระบวนการผลิตฟองอากาศโดยใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ถูกคิดค้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 แนวคิดของกระบวนการนี้คือ การเตรียมฟองอากาศหรือโฟมขึ้นมาก่อน เรียกว่า preformed foam แล้วผสมลงไปในการคอนกรีตสด ในช่วงแรก ๆ สารสร้างฟองอากาศที่ใช้คือผงซักฟอกหรือน้ำยาซักผ้า ซึ่งมีข้อเสียคือฟองอากาศที่ได้มักจะไม่เสถียรและแตกง่าย

ปัจจุบันมีการใช้สารกักกระจายฟองอากาศที่มีองค์ประกอบทางเคมีจำพวก hydrolyzed protein และสารซักฟองสังเคราะห์ (synthetic detergents) โดยฟองอากาศที่ได้จะมีความเสถียรและคงรูปมากกว่าฟองอากาศที่ได้โดยผงซักฟอก กระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาชนิดนี้เริ่มจากการสร้างฟองอากาศด้วยเครื่องสร้างฟอง โฟม (foam generator) หลังจากนั้น นำฟองอากาศที่ได้ฉีดพ่นเข้าไปในโม้ผสมคอนกรีตที่มีซีเมนต์ ทรายและน้ำอยู่ข้างใน ทำการผสมไปที่ความเร็วรอบของโม้ผสมช้า ๆ จนฟองอากาศกระจายแทรกตัวในเนื้อคอนกรีตอย่างสม่ำเสมอ ควรระวังการผสมที่ความเร็วรอบสูง เพราะฟองอากาศจะเกิดการแตกตัว ในขั้นตอนการเทคอนกรีตควรเทให้เกินจากแบบเล็กน้อย เพื่อป้องกันการยุบตัวของคอนกรีต แล้วค่อยปาดหน้าผิวเรียบหลังจากเทคอนกรีต 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้ทั้งคอนกรีตแข็งตัวซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อ ซึ่งจะได้คอนกรีตที่มีรูพรุนสูงและน้ำหนักเบา แสดงดังรูปที่ 2.3

ข้อดีของกระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาด้วยวิธีนี้คือ ขั้นตอนไม่ยุ่งยากเมื่อเทียบกับวิธีการผลิตฟองอากาศโดยใช้ผงอลูมินัมออกไซด์ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อนและความดันเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้มีต้นทุนด้านพลังงานต่ำ แต่ข้อด้อยของคอนกรีตมวลเบาที่ได้โดยวิธีนี้มักจะมีน้ำหนักมากกว่าวิธีการผลิตฟองอากาศโดยใช้ผงอะลูมินัมออกไซด์เล็กน้อย และหากทำการคำนวณสัดส่วนผสมไม่ดี มักจะเกิดการแยกตัวของมวลรวมที่หนักกว่าตกตะกอนลงที่ด้านล่าง ส่วนฟองอากาศที่เบากว่าจะลอยตัวขึ้นด้านบน นอกจากนี้ในการผลิตจะต้องอาศัยความชำนาญของช่างควบคุมเครื่องผลิตฟองอากาศเพื่อให้ได้ปริมาณฟองที่สม่ำเสมอใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2.3 ภาพฟองอากาศบนพื้นผิวหน้าของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

2.3 ส่วนประกอบคอนกรีตมวลเบาชนิดเซลลูลาร์

2.3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (ordinary portland cement; OPC) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ใช้กันมากที่สุดสำหรับงานคอนกรีตทั่วไป เช่น เสา คาน ฐานรากของอาคาร ถนน เป็นต้น ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังและความร้อนปานกลางเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทอื่น ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราช้าง ตราเพชร ตราพญานาคสีเขียว และตราทีพีโอเขียว เป็นต้น

2.3.2 เถ้าลอย

เถ้าลอย (fly ash) ได้จากการเผาถ่านหินในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหินที่มีขนาดใหญ่จะตกลงยังก้นเตา ขณะที่เถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมโครเมตร จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่า เถ้าลอย ซึ่งจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิตย์ เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานใช้ผสมปูนซีเมนต์ในการทำคอนกรีตได้ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2553)

2.3.3 มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียด (fine aggregates) คือมวลรวมที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (ช่องเปิด 4.75 มม.) แต่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 200 (ช่องเปิด 75 ไมโครเมตร) มวลรวมละเอียดมีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของทั้งคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว สำหรับการผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์โดยทั่วไปนิยมใช้มวลรวมละเอียดที่เกิดตามธรรมชาติ (ทราย) ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของทรายที่ต้องคำนึงถึงได้แก่ ความแข็งแรง ความสะอาด และขนาดกละ เป็นต้น

มวลรวมที่คืนนอกจากคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้นแล้วยังต้องสามารถยึดเหนี่ยว (bond) กับซีเมนต์เพสต์ได้คืออีกด้วย การยึดเหนี่ยวดังกล่าวขึ้นอยู่กับรูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวม ตามมาตรฐาน BS 882 แบ่งรูปร่างของมวลรวมออกเป็น 6 แบบ ได้แก่ มน (rounded), ก้อนเบี้ยว (irregular), แบน (flaky), เหลี่ยม (angular), ยาว (elongated), และแบนและยาว (flaky and elongated) และแบ่งลักษณะผิวเป็น 6 แบบ ได้แก่ แก้ว (glassy), เรียบ (smooth), เม็ด (granular), หยาบ (rough), ผลึก (crystalline) และรังผึ้ง (honeycombed)

รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมมีผลต่อกำลังของคอนกรีต โดยเฉพาะมวลรวมก้อนเหลี่ยมและผิวหยาบจะมีพื้นที่ผิวที่สูง ทำให้มีพื้นที่สำหรับการยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์มากขึ้น ดังนั้นกำลังของคอนกรีตจึงดีขึ้นด้วย

2.3.4 น้ำ

น้ำเป็นส่วนผสมที่สำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของคอนกรีต นอกจากมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์แล้ว ยังต้องการน้ำในด้านอื่น เช่น การบ่มคอนกรีต การทำความสะอาดทั้งมวลรวม แบบหล่อ และเครื่องผสม เป็นต้น น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตควรเป็นน้ำจืดที่สะอาด โดยส่วนใหญ่นิยมใช้น้ำประปา ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของน้ำที่ต้องคำนึงถึงคือ สารแปลกปลอมที่เจือปนอยู่ในน้ำ ถ้าหากมีสารแปลกปลอมดังกล่าวเจือปนอยู่มาก อาจก่อปัญหา ด้านระยะเวลาการก่อตัว การหดตัวของคอนกรีต การมีรอยคราบเกลือ (efflorescence) อยู่ที่ผิวของคอนกรีต และอาจส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตที่ต่ำลง ตลอดจนความคงทนของคอนกรีตลดลง สารแปลกปลอมสามารถแบ่งออกได้เป็นสารแขวนลอย สารละลายอินทรีย์ และสารละลายอนินทรีย์ ตามมาตรฐาน BS 3148

2.3.5 สารเพิ่มฟองอากาศ

สารเพิ่มฟองอากาศ (foaming agent) คือสารที่ทำให้เกิดฟองอากาศ โดยใช้หลักการลดแรงตึงผิวของน้ำ ทำให้เกิดฟองเวลาผสมกับน้ำคล้ายสบู่ แต่ฟองอากาศมีขนาดเล็กกว่ามาก และมีความคงตัว (ไม่แตก) ขณะทำการผสมคอนกรีตจนกระทั่งคอนกรีตแข็งตัว วัสดุที่ใช้เป็นสารเพิ่มฟองอากาศมีอยู่หลายชนิด ส่วนมากเป็นสารประกอบจำพวกกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) หรือกรดซัลโฟนิก (sulfonic acids) ผสมกับไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) นอกจากนี้อาจเป็นสารจำพวกเกลือเรซินของไม้ (salt of wood resin), ดีเทอร์เจนสังเคราะห์ (synthetic detergents), เกลือของซัลโฟเนตลิกนิน (salts of sulfonated lignin), เกลือของกรดปิโตรเลียม (salt of petroleum acids) และไขมันบางชนิด เป็นต้น สารที่ใช้ในปัจจุบันส่วนมากได้มาจากอุตสาหกรรมกระดาษ ปิโตรเคมี และผลิตภัณฑ์จากสัตว์ ปริมาณของสารจะใช้น้อยมาก ประมาณร้อยละ 0.005-0.05 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ เนื่องจากใช้ผสมกับน้ำเพื่อลดความเข้มข้นของปริมาณสารและลดแรงตึงผิวของน้ำเท่านั้น (ปริญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2556)

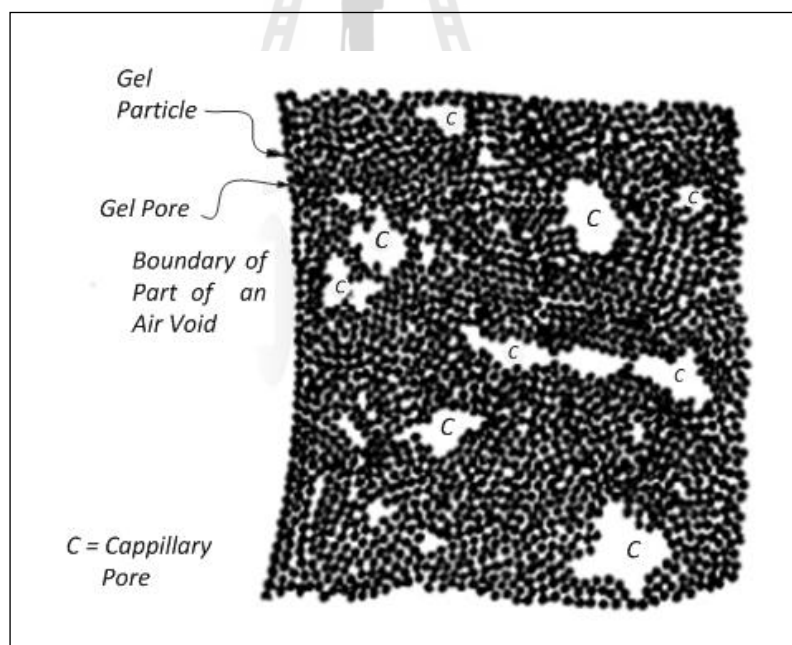
2.4 โครงสร้างโพรงของคอนกรีตมวลเบา

ขนาดและโครงสร้างของโพรงมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา โดยทั่วไป โครงสร้างโพรง (pore structure) ของคอนกรีตมวลเบาประกอบด้วย 3 ส่วน (ปริญญา จินดา ประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2556) แสดงดังรูปที่ 2.4

1) โพรงเจล (gel pore) คือช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์เจล (gel particle) ที่เห็นเป็นทรงกลมสีดำที่ขนาดเล็ก ซึ่งโพรงเจลนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างของซีเมนต์เจล โดยทั่วไปโพรงเจลมีขนาดเล็กมากประมาณ 0.0005-0.01 ไมโครเมตร

2) โพรงคาปิลารี (capillary pore) คือช่องว่างของน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งมีขนาดประมาณ 0.01-10 ไมโครเมตร

3) ช่องว่างอากาศ (air void) คือช่องว่างที่เกิดจากการกักฟองอากาศ (air entrained) ของสารเพิ่มฟองอากาศ หรือเกิดจากการเทคอนกรีต (entrapped pore) ซึ่งมักจะมีขนาดใหญ่กว่าโพรงเจลและโพรงคาปิลารี โดยทั่วไปช่องว่างอากาศมีขนาดประมาณ 0.1-1.0 มม.



รูปที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ (Powers and Helmut, 1953)

2.5 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา การรีไซเคิลเศษพลาสติก โดยใช้เป็นวัสดุผสมในวัสดุก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งผนังคอนกรีต ซึ่งแนวทางการรีไซเคิลเศษพลาสติกนี้ทำให้เกิดเป็นวัสดุใหม่ ที่เรียกว่า ซีเมนต์คอมโพสิต ซึ่งเป็นหนึ่งในการแก้ปัญหาที่ดีและเป็นที่ยอมรับอย่างมาก เนื่องจาก ข้อได้เปรียบทางเศรษฐศาสตร์และนิเวศวิทยา ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้ทบทวนและรวบรวมงานวิจัย ที่เกี่ยวข้อง ในการรีไซเคิลเศษพลาสติก โดยใช้เป็นมวลรวมในวัสดุก่อสร้างทั้งในและต่างประเทศ ไว้ดังนี้

ในปี ค.ศ. 2005 Choi et al. (2005) ประเทศเกาหลีใต้ ได้รายงานการศึกษาผลกระทบของ มวลรวมละเอียดจากเศษขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate; PET) ต่อคอนกรีต มวลรวมละเอียดที่ใช้คือเศษขวด PET ที่หุ้มด้วยเศษตะกรันจากเตาหลอม (blast-furnace slag) การผสมระหว่างเศษทั้งสองอยู่ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราส่วนน้ำ ต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 0.49 และ 0.53 ตามลำดับ การแทนที่ทรายด้วยเศษขวด PET ร้อยละ เท่ากับ 0 25 50 และ 75 โดยปริมาตร ผลการศึกษาพบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษขวด PET ที่หุ้ม ด้วยเศษตะกรันจากเตาหลอมที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง อีกทั้งยังพบว่าการแทนที่ทรายด้วยเศษขวด PET ที่หุ้มด้วยเศษตะกรันจากเตาหลอมที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการยุบตัว (slump values) ของคอนกรีตเพิ่มขึ้น แต่ค่ากำลังรับแรงอัด (compressive strength) และค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (splitting tensile strength) ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแทนที่ร้อยละ 75 ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงสูงถึงร้อยละ 33 และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นก็ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเช่นเดียวกัน

ในปีเดียวกัน Silva et al. (2005) ประเทศบราซิล ได้รายงานการศึกษากการเสื่อมสภาพของ เส้นใย PET รีไซเคิลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 26 ไมโครเมตร และมีขนาดความยาวเท่ากับ 20 มิลลิเมตร ในวัสดุซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1:3 และอัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.61 ที่อัตราส่วนผสมเส้นใย PET รีไซเคิลร้อยละ 0.4 และ 0.8 โดยปริมาตร จากการศึกษาพบว่า การผสมเส้นใย PET รีไซเคิลร้อยละ 0.4 และ 0.8 โดยปริมาตร ในคอนกรีต ไม่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงอัดและค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก และยังพบอีกว่าคอนกรีต ผสมเศษเส้นใย PET รีไซเคิลอายุ 164 วัน สามารถช่วยย่อยสลายเส้นใย PET ได้

ในปีเดียวกัน Laukaitis et al. (2005) ประเทศลิทัวเนีย ได้รายงานการศึกษาผลกระทบของเม็ดโพลีโพลีสไตรีน (polystyrene) ต่อคอนกรีตผสม โดยทำการศึกษาเม็ดโพลีโพลีสไตรีนที่แตกต่างกันสามแบบคือ แบบเม็ดใหญ่ (large) แบบเม็ดร่วน (crumbled) และแบบเม็ดละเอียด (fine) ที่มีอัตราส่วนซีเมนต์ต่อเม็ดโพลีโพลีสไตรีนเท่ากับ 1:1 1:1.5 1:2 1:2.5 และ 1:3 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนซีเมนต์ต่อเม็ดโพลีโพลีสไตรีนที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของความหนาดังกล่าว ยังทำให้กำลังรับแรงอัดและการนำความร้อนของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยเม็ดโพลีโพลีสไตรีนแบบละเอียด ส่งผลให้คอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าแบบใหญ่และแบบร่วนตามลำดับ อีกทั้งเม็ดโพลีโพลีสไตรีนแบบร่วนส่งผลให้คอนกรีตมีค่าการนำความร้อนน้อยกว่าแบบละเอียดและแบบใหญ่ตามลำดับ จากการศึกษาสามารถกล่าวได้ว่า เศษเม็ดโพลีโพลีสไตรีนสามารถนำมารีไซเคิลโดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมเบาในคอนกรีตผสมได้ โดยมีสมบัติในการเป็นฉนวนกันความร้อนที่เหมาะสมในช่วงความหนาแน่น 150-170 kg/m³ ซึ่งมีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.060-0.064 W/m.K และกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 0.25-0.28 N/mm²

ในปี ค.ศ. 2007 Marzouk et al. (2007) ประเทศฝรั่งเศส ได้รายงานการศึกษารวมเศษขวด PET ในมอร์ตาร์ ที่มีขนาดแตกต่างกันสามแบบ (A, C และ D) คือ ขนาดน้อยกว่า 0.5 0.2 และ 0.1 ซม. ตามลำดับ และการแทนที่ทรายร้อยละ 2 5 10 15 20 30 50 70 และ 100 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2.8 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ผลการศึกษาพบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษขวด PET ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกและกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตลดลง อีกทั้งขนาดอนุภาคของเศษขวด PET ที่ใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

ในปีเดียวกัน Batayneh et al. (2007) ประเทศจอร์แดน ได้รายงานการเลือกใช้เศษวัสดุจากงานก่อสร้างมาผสมในคอนกรีต จากการศึกษาพบว่า เศษวัสดุจากงานก่อสร้างที่พบมากที่สุดคือ เศษไม้ร้อยละ 30 รองลงมาเป็น เศษคอนกรีต เศษอิฐบล็อก ยิปซัม เหล็ก วัสดุห่อ ยางมะตอย พลาสติกและแก้วร้อยละ 14 14 12 8 5 4 3 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งการศึกษานี้ได้นำเศษพลาสติกและแก้วแทนทรายร้อยละ 5 10 15 และ 20 ตามลำดับ และนำเศษคอนกรีตแทนมวลรวมหยาบร้อยละ 5 10 15 และ 20 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า การแทนที่ทั้งสามที่กล่าวมาข้างต้น ส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตลดลง จากการศึกษายังพบอีกว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษพลาสติกที่เพิ่มขึ้น ทำให้กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกและกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตลดลง ขณะที่การแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วที่เพิ่มขึ้น ทำให้กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกและกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น อีกทั้งการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยเศษคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ทำให้กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกและกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตลดลง

ในปี ค.ศ. 2008 Panyakapo and Panyakapo (2008) ประเทศไทย ได้รายงานการศึกษา การนำ เศษเทอร์โมเซตติงมาใช้ในคอนกรีตมวลเบา โดยใช้เศษเมลามีนผสมในคอนกรีตมวลเบาแบบอบไอน้ำ (autoclaved aerated lightweight concrete) ที่มีส่วนผสมระหว่าง ปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ ฝ้าลอย ผงอลูมิเนียม และเศษเมลามีน ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อให้ผ่านเกณฑ์คอนกรีตมวลเบาแบบไม่รับแรง (non-load-bearing lightweight concrete) ตามมาตรฐาน ASTM C129 กล่าวคือ ต้องมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 4.14 N/mm^2 และความหนาแน่นไม่เกิน 1395 kg/m^3 ซึ่งผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเศษเมลามีนส่งผลให้ความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดลดลง การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนทรายส่งผลให้ความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนฝ้าลอยส่งผลให้ความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนผงอลูมิเนียมส่งผลให้ความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงลดลง อัตราส่วนผสมระหว่าง ปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ ฝ้าลอย ผงอลูมิเนียม และเศษเมลามีน ที่ผ่านเกณฑ์ดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 1:0.8:0.75:0.3:0.0035:0.9 โดยน้ำหนัก

ในปีเดียวกัน Ismail and Hashmi (2008) ประเทศอิรัก ได้รายงานการใช้เศษพลาสติกในคอนกรีตโดยการแทนที่มวลรวม ซึ่งเศษพลาสติกที่ใช้ประกอบด้วย พอลิเอทิลีนและพอลิสไตรีน ร้อยละ 80 และ 20 ตามลำดับ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.53 และส่วนผสมทราย หินและปูนซีเมนต์เท่ากับ 715 1020 และ 380 kg/m^3 ตามลำดับ โดยการแทนที่ทรายด้วยเศษพลาสติก ร้อยละ 10 15 และ 20 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษพลาสติกที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการยุบตัว ความหนาแน่นเปียก ความหนาแน่นแห้ง กำลังรับแรงอัด และค่ากำลังรับแรงดัดลดลง

ในปีเดียวกัน Mounanga et al. (2008) ประเทศฝรั่งเศส ได้รายงานการศึกษาสัดส่วนและลักษณะของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษ โฟม PUR ที่แตกต่างกันสองแบบคือ แบบละเอียด ที่มีขนาด 0-10 มม. และแบบหยาบมีขนาดใหญ่กว่า 10 มม. ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4 0.5 0.6 0.7 และ 0.8 อัตราส่วนวัสดุเดิมต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0 1 1.5 2 และ 3.5 และอัตราส่วนเศษ โฟม PUR ต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.02 0.03 0.04 0.05 0.07 0.12 และ 0.15 ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณเศษโฟม PUR ในคอนกรีตส่งผลให้ความหนาแน่น การหดตัวแห้งและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ

ในปี 2009 Albano et al. (2009) ประเทศเวเนซุเอลา ได้รายงานการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคของเศษขวด PET ต่อคอนกรีต โดยมีสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกัน ซึ่งขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเศษขวด PET ที่ใช้แตกต่างกันสองแบบคือ 0.26 และ 1.14 ซม. (แบบเล็กและแบบใหญ่ตามลำดับ) การแทนที่ทรายด้วยเศษขวด PET ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร และสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.50 และ 0.60 ผลการศึกษาพบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษขวด PET ที่เพิ่มขึ้นโดยปริมาตร อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาค และสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่ายุบตัวกำลังรับแรงอัด แรงดึงแบบผ่าซีกและความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิค (ultrasonic velocity) ลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ ซึ่งการลดลงของกำลังรับแรงอัดที่และแรงดึงแบบผ่าซีก ส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity of concrete) ของคอนกรีตลดลงเช่นเดียวกัน ในทางกลับกันในแง่ของการดูดซึมน้ำ (water absorption) พบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษขวด PET ที่เพิ่มขึ้นโดยปริมาตร และการเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น อีกทั้งสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นยังทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกัน เมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ จากงานวิจัยดังกล่าวยังพบว่า อิทธิพลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้องไปสู่อุณหภูมิ 200 400 และ 600 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกลดลง จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า ถึงแม้การผสมเศษขวด PET ในคอนกรีต ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง แต่ก็สามารถช่วยลดขยะขวด PET ลงได้ ซึ่งเป็นผลดีต่อระบบนิเวศ อีกทั้งการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีต สามารถนำไปใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับน้ำเช่นสนามกีฬาและท่อระบายน้ำเป็นต้น

ในปีเดียวกัน Choi et al. (2009) ประเทศเกาหลีใต้ ได้รายงานการศึกษา คุณสมบัติของคอนกรีตและมอร์ตาร์ที่ผสมมวลรวมละเอียดจากเศษขวด PET ซึ่งมวลรวมละเอียดที่ใช้คือทรายแม่น้ำที่ถูกหุ้มด้วยเศษขวด PET โดยวิธีการผสมที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส มวลรวมดังกล่าวมีค่ามอดูลัสความละเอียดเท่ากับ 4.11 อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1: 2.44 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 0.49 และ 0.53 ตามลำดับ และการแทนที่ทรายด้วยเศษขวด PET ร้อยละเท่ากับ 0 25 50 75 และ 100 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า การหุ้มทรายด้วยเศษขวด PET ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมลดลง โดยเฉพาะการแทนที่ทรายด้วยเศษขวด PET ร้อยละ 100 ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมลดลงเป็นศูนย์ อีกทั้งยังพบว่าการแทนที่ทรายด้วยเศษขวด PET ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการยุบของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น แต่ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแทนที่ร้อยละ 75 ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงถึงร้อยละ 30 และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นก็ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเช่นเดียวกัน

ในปีเดียวกัน Yesilata et al. (2009) ประเทศตุรกี ได้รายงานการศึกษา การปรับปรุงสมบัติ การเป็นฉนวนความร้อนของคอนกรีตโดยการผสมเศษขวด PET และยาง ตามรูปร่างที่แตกต่างกัน สามแบบ ประกอบด้วย แบบตาราง แบบแถบและแบบเหลี่ยม ที่มีอัตราการผลิตผสมดังกล่าวร้อยละ เท่ากับ 10.27 17.11 และ 17.16 ตามลำดับ และผสมยางแบบตารางร้อยละ 18.52 ที่อัตราส่วน ซีเมนต์ต่อทรายต่อน้ำเท่ากับ 1:2.75:0.5 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า การผสมเศษขวด PET และยาง มีส่วนช่วยปรับปรุงความเป็นฉนวนของคอนกรีตได้ ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า งานวิจัยนี้ สามารถช่วยลดปริมาณขยะจากขวดน้ำดื่ม PET และยางได้ ด้วยการปรับปรุงสมบัติทางกลในแง่ ของการเป็นฉนวนความร้อนของคอนกรีต

ในปีเดียวกัน Kou et al. (2009) ประเทศฮ่องกง ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา ผสมเศษ PVC ที่มีขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร โดยการแทนที่ทรายด้วยเศษ PVC ร้อยละ 0 5 15 30 และ 45 โดยปริมาตร อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.32 ผลการศึกษาพบว่า การแทนที่ทราย ด้วยเศษ PVC ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่น กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบ ฝ่าซิกข์ของคอนกรีตลดลง ซึ่งส่งผลให้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นลดลงเช่นกัน ในทางกลับการแทนที่ทราย ด้วยเศษ PVC ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความเหนียว (ductility) เพิ่มขึ้น

ในปีเดียวกัน Kan and Demirboga (2009) ประเทศตุรกี ได้รายงานการผลิตคอนกรีตมวล เบาด้วยวัสดุใหม่ โดยใช้เศษโฟมพอลิสไตรีน (expanded polystyrene foam: EPS) ที่มีขนาดอนุภาค มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบเท่ากับ 0-4 และ 4-16 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยการแทนที่วัสดุ มวลรวมธรรมชาติด้วยเศษ EPS ร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 โดยปริมาตร ตามลำดับ ผลการศึกษา พบว่า คอนกรีตผสมเศษ EPS ที่ความหนาแน่น 900-1,700 kg/m³ ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 12.58-23.34 เมกะพาสคัล

ในปีเดียวกัน Kan and Demirboga (2009) ประเทศตุรกี ได้รายงานเทคนิคใหม่สำหรับ มวลรวมจากเศษโฟมพอลิสไตรีน โดยการนำเศษโฟมพอลิสไตรีนที่ได้มาหั่นเป็นที่แตกต่างกัน สองแบบคือ แบบลูกบาศก์และแบบแผ่นขนาด 50x50x50 มม. และ 300x200x35 มม. ตามลำดับ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ ดังนี้ อุณหภูมิ 100 110 120 130 140 และ 150 องศา เซลเซียส และ เวลา 15 30 45 60 และ 120 นาที จากผลการศึกษาพบว่า ความร้อนส่งผลให้ เศษโฟมพอลิสไตรีนหดตัว ซึ่งทำให้ค่าความหนาแน่น การนำความร้อนและกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ซึ่งอุณหภูมิและเวลาการอบที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที ซึ่งทำให้ได้ มวลรวมจากเศษโฟมพอลิสไตรีนที่มีความหนาแน่น การนำความร้อนและกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 217 kg/m³, 0.0555 W/m.K และ 8.29 MPa ตามลำดับ

ในปีเดียวกัน Remadnia et al. (2009) ประเทศฝรั่งเศส ได้รายงานการใช้โปรตีนจากสัตว์ แทนสารเพิ่มฟองอากาศในคอนกรีตผสมเศษขวด PET โดยเศษขวด PET มีขนาดไม่เกิน 4 มม. โดยการแทนที่ทรายร้อยละ 35 ที่อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2.8 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และสัดส่วนฮีโมโกลบิน (hemoglobin) ต่อซีเมนต์ร้อยละ 0.5 1 และ 2 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า สัดส่วนการผสมฮีโมโกลบินต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกลดลงร้อยละ 54.41 และ 45.35 ตามลำดับ

ในปี ค.ศ. 2010 Akcaozoglu et al. (2010) จากมหาวิทยาลัย Nigde ประเทศตุรกี ได้รายงานการใช้เศษขวด PET ขนาด 0-4 มม. เป็นวัสดุมวลรวมในมอร์ต้า ที่อัตราส่วนเศษขวด PET ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และยังใช้เศษตะกรันจากเตาหลอม (blast-furnace slag; BFS) แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ซึ่งเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปกติ ผลการศึกษาพบว่า เศษตะกรันจากเตาหลอมทำให้ความหนาแน่นแห้ง (dry density) ของมอร์ต้าร์ลดลงเนื่องจากเศษตะกรันจากเตาหลอมมีความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ ในแง่ของกำลังรับแรงอัด พบว่า มอร์ต้าร์ที่ผสมมวลรวมที่ประกอบด้วยทรายกับเศษขวด PET มีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่า มอร์ต้าร์ที่ผสมมวลรวมเศษขวด PET อย่างเดียว อีกทั้งการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเศษตะกรันจากเตาหลอมทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์สูงขึ้น ซึ่งการผสมทั้งหมดดังที่กล่าวมานั้น ต่างผ่านเกณฑ์ของ ACI Committee 213R (1987) แต่หากเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปกติ ยังถือว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าอยู่ประมาณ 50% ในแง่ของความแข็งแรงดัด (flexural-tensile strength) พบว่า การผสมเศษขวด PET และเศษตะกรันจากเตาหลอมไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงดัดของมอร์ต้าร์ แต่หากเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปกติยังถือว่ามีค่าความแข็งแรงดัดที่ต่ำกว่าอยู่ประมาณ 46% ในแง่ของการดูดซึมน้ำ (water absorption) พบว่า มอร์ต้าร์ที่ผสมมวลรวมที่ประกอบด้วยทรายกับเศษขวด PET มีค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่า มอร์ต้าร์ที่ผสมมวลรวมเศษขวด PET อย่างเดียว อีกทั้งการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเศษตะกรันจากเตาหลอมทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ต้าร์สูงขึ้น จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า เศษขวด PET มีศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุมวลรวมในคอนกรีตมวลเบาได้ ซึ่งมีผลดีทางด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

ในปีเดียวกัน Kim et al. (2010) ประเทศเกาหลีใต้ ได้รายงานการประเมินประสิทธิภาพของคอนกรีตผสมเส้นใย PET รีไซเคิล เปรียบเทียบกับเส้นใยโพรพิลีน (Polypropylene; PP) ที่สัดส่วนร้อยละ 0.5 0.75 และ 1.0 โดยปริมาตร และสัดส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานเท่ากับ 0.41 โดยเส้นใยทั้งคู่มีขนาดความยาวเท่ากับ 50 มิลลิเมตร จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของเศษเส้นใย PET ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดและมอดูลัสยืดหยุ่นลดลงประมาณร้อยละ 1-9 เมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติที่ไม่เติมเส้นใย อีกทั้งเส้นใย PP ยังทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดและมอดูลัสยืดหยุ่นลดลงเช่นเดียวกันประมาณร้อยละ 1-10 อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของเส้นใยทั้งสองยังทำให้การหดตัวแห้งของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

ในปีเดียวกัน Asokan et al. (2010) ประเทศอินเดีย ได้รายงานการปรับปรุงสมบัติทางกลของเศษผงใยแก้ว (glass fiber reinforced plastic; GRP) ในคอนกรีต โดยเศษผงใยแก้วที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2 มม. จะถูกนำมาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 5 และ 15 ที่สัดส่วนซีเมนต์ มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ เท่ากับ 430 750 และ 1,250 กก. ต่อปริมาตรผสม 1 ลบ.ม. ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.34 0.37 และ 0.38 ผลการศึกษาพบว่า การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสูงกว่าการบ่มแบบแห้ง อีกทั้งการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเศษผงใยแก้วส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นและสูงสุดที่การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเศษผงใยแก้วร้อยละ 5 อีกทั้งยังทำให้ค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเพิ่มขึ้น และยังช่วยให้ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตลดลง

ในปีเดียวกัน Hannawi et al. (2010) ประเทศฝรั่งเศส ได้รายงานการศึกษา สมบัติทางกายภาพและทางกลของมอร์ต้าผสมเศษ PET และเศษ PC โดยการแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 3 10 20 และ 50 ที่สัดส่วนปูนซีเมนต์และทรายเท่ากับ 513 และ 1,539 กก. ต่อปริมาตรผสม 1 ลบ.ม. ตามลำดับ ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ผลการศึกษาพบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษ PET และเศษ PC ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่น กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของมอร์ต้าลดลง โดยการลดลงของกำลังรับแรงอัดสูงถึงร้อยละ 69 และ 63.9 สำหรับมอร์ต้าผสมเศษ PET และเศษ PC ร้อยละ 50 ตามลำดับ และการลดลงของกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกสูงถึงร้อยละ 17.9 และ 32.8 สำหรับมอร์ต้าผสมเศษ PET และเศษ PC ร้อยละ 50 ตามลำดับ

ในปีเดียวกัน Fraj et al. (2010) ประเทศฝรั่งเศส ได้รายงานการศึกษาความแตกต่างของมวลรวมหยาบจากเศษโฟม PUR ในคอนกรีตมวลเบา โดยเศษโฟม PUR มีขนาด 8-20 มม. และปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยเศษโฟม PUR ร้อยละ 34-45 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.44 และ 0.55 ผลการศึกษาพบว่า การแทนที่มวลรวมหยาบด้วยเศษโฟม PUR ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความพรุนและการหดตัวแห้งของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ขณะที่การแทนที่มวลรวมหยาบด้วยเศษโฟม PUR ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังรับรับแรงอัดและมอดูลัสยืดหยุ่นลดลง อยู่ในช่วง 8-16 MPa และ 10-15 GPa ตามลำดับ

ในปีเดียวกัน Frigione (2010) ประเทศอิตาลี ได้รายงานการศึกษา การรีไซเคิลเศษขวด PET โดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมในคอนกรีต โดยเศษขวด PET มีขนาด 0.1-5.0 มม. โดยการแทนที่ทรายร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์เท่ากับ 7.0 และ 4.8 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55 ผลการศึกษาพบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษขวด PET ร้อยละ 5 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกลดลงไม่เกินร้อยละ 2 และ 2.4 ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนมวลรวมต่อปูนซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลง ทำให้กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกเพิ่มขึ้น อีกทั้งคอนกรีตที่มีอายุ 365 วัน มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับอายุ 28 วัน

ในปี ค.ศ. 2012 Rahman et al. (2012) ประเทศบังกลาเทศ ได้รายงานการศึกษา การรีไซเคิลเศษพลาสติกโดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมในคอนกรีตและอิฐบล็อก โดยการนำเศษพลาสติกที่แตกต่างกันสองแบบคือ เศษพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene; HDPE) และเศษพอลิยูรีเทนฟอร์มัลดีไฮด์ (polyurethane formaldehyde; PUF) ที่มีขนาดอนุภาค 4.0-12.0 และ 4.0-8.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ สำหรับการผสมเศษ HDPE ในคอนกรีตที่อัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบ เท่ากับ 1:2:4 ตามลำดับ และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4 โดยการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยเศษ HDPE ร้อยละ 10 15 20 และ 25 โดยปริมาตร และการผสมเศษ PUF ในอิฐบล็อก ที่อัตราส่วนระหว่าง ปูนซีเมนต์ ทราย และเศษ PUF เท่ากับ 1:0.5:1-0.85 ตามลำดับ และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4 โดยการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยเศษ PUF ร้อยละ 33-90 โดยปริมาตร ผลการศึกษาพบว่า การผสมเศษ HDPE ในคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง อีกทั้งการผสมเศษ PUF ในอิฐบล็อกที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำและความพรุนของอิฐบล็อกลดลง

ในปี ค.ศ. 2014 Saikia and Brito (2014) ได้รายงานการศึกษา สมบัติเชิงกลของคอนกรีตผสมเศษขวด PET โดยการแทนที่มวลรวมธรรมชาติ ที่มีรูปร่างแตกต่างกันสามแบบคือ แบบแบน (flaky), แบบหยาบ (coarse), และแบบเม็ด (pellet) โดยการแทนที่ทรายร้อยละ 5 10 และ 15 โดยปริมาตร จากการศึกษาพบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษขวด PET ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก มอดูลัสยืดหยุ่นและกำลังรับแรงดัดลดลง อีกทั้งรูปแบบเศษขวด PET ยังมีผลต่อกำลังของคอนกรีต กล่าวคือ เศษขวด PET แบบเม็ดให้กำลังรับแรงของคอนกรีตได้ดีกว่าแบบแบนและแบบหยาบ ตามลำดับ

การรีไซเคิลขยะพลาสติก โดยใช้เป็นวัสดุผสมในวัสดุก่อสร้าง ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งได้รวบรวมตั้งแต่ปี ค.ศ. 2005-2014 โดยจำแนกเป็น ชนิดของขยะพลาสติกที่นำมารีไซเคิล ปริมาณการแทนที่ และประเภทของวัสดุก่อสร้าง สามารถแสดงโดยสรุปดังตารางที่ 2.2 พบว่า การรีไซเคิลเศษพลาสติกโดยใช้เป็นวัสดุผสมในงานคอนกรีตส่วนใหญ่เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก จำพวกเศษพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate; PET) จากขวดน้ำดื่ม เนื่องจากพลาสติกประเภทนี้มีการอุปโภคในปริมาณที่สูงมาก อีกทั้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในส่วนของ การรีไซเคิลพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงในงานคอนกรีตยังมีอยู่น้อย อีกทั้งจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวยังทำให้ผู้วิจัยพบว่า การรีไซเคิลเศษพลาสติกโดยใช้เป็นวัสดุผสมในงานคอนกรีต ส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีต โดยสรุปแสดงดังตารางที่ 2.3 ดังนี้



ตารางที่ 2.2 การแทนที่มวลรวมธรรมชาติด้วยมวลรวมพลาสติกในซีเมนต์มอร์ตาร์/คอนกรีต

Year	Reference	Types of composite	Plastic waste	Amounts of substitution
2005	Choi	Mortar	PET-bottle	With fine aggregate 0, 25, 50 and 75 vol.%
	Silva	Mortar	PET-fiber	Content of fiber 0.4 and 0.8 vol.%
	Laukaitis	Mortar	Foam polystyrene	Cement : polystyrene 1:1, 1:1.5, 1:2, 1:2.5 and 1:3
2007	Marzouk	Mortar	PET-bottle	With fine aggregate 2, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70 and 100 vol.%
	Butayneh	Mortar and concrete	Plastic, glass and concrete waste	With fine and coarse aggregate 0, 5, 10, 15 and 20 vol.%
2008	Panyakapo	Non-load-bearing lightweight concrete	Melamine	With sand fraction in aerated concrete
	Ismail	Concrete	Plastic containers (80% polyethylene and 20% polystyrene)	With fine aggregate 10, 15 and 20 vol.%
	Mounanga	Mortar	Polyurethane foam	Polyurethane foam : Cement 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.07, 0.12 and 0.15
2009	Albano	Concrete	PET-bottle	With fine aggregate 10 and 20 vol.%
	Choi	Mortar and concrete	PET-bottle	With fine aggregate 0, 25, 50, 75 and 100 vol.%
	Yesilata	Concrete	PET-bottle and rubber	Content of PET 10.27, 17.11 and 17.16 and Content of rubber 18.52 w.%
	Kou	Lightweight aggregate concrete	PVC pipe	With fine aggregate 0, 5, 15, 30 and 45 vol.%
	Kan	Concrete	Polyurethane foam	With fine aggregate 0, 25, 50, 75 and 100 vol.%
	Kan	Concrete	Polyurethane foam	Temp. 100, 110, 120, 130, 140 and 150 °C and Time 15, 30, 45, 60 and 120 min.
	Remadnia	Mortar	PET-bottle	With fine aggregate 35 vol.%
2010	Akcaozoglu	Mortar	PET-bottle	With fine aggregate 50 and 100 vol.%
	Kim	Mortar	PET and PP-fiber	Fiber fraction 0.50, 0.75 and 1.0 vol.%
	Asokan	Concrete	glass fiber reinforced plastic	With fine aggregate 5 and 15 vol.%
	Hannawi	Concrete	PET and PC waste	With fine aggregate 3, 10, 20 and 50 vol.%
	Fraj	Concrete	PUR foam waste	With coarse aggregate 34-45 vol.% of concrete
	Frigione	Concrete	PET-bottle	With fine aggregate 5 w.%

ตารางที่ 2.2 การแทนที่มวลรวมธรรมชาติด้วยมวลรวมพลาสติกในซีเมนต์มอร์ตาร์/คอนกรีต (ต่อ)

Year	Reference	Types of composite	Origin of plastic waste	Types and amounts of substitution
2012	Rahman	Concrete and block	HDPE and PUF waste	With coarse aggregate 10, 15, 20 and 25 vol.% and 33-90 vol.%
2014	Saikia	Concrete	PET-bottle	With natural aggregate 5, 10, and 15 vol.%

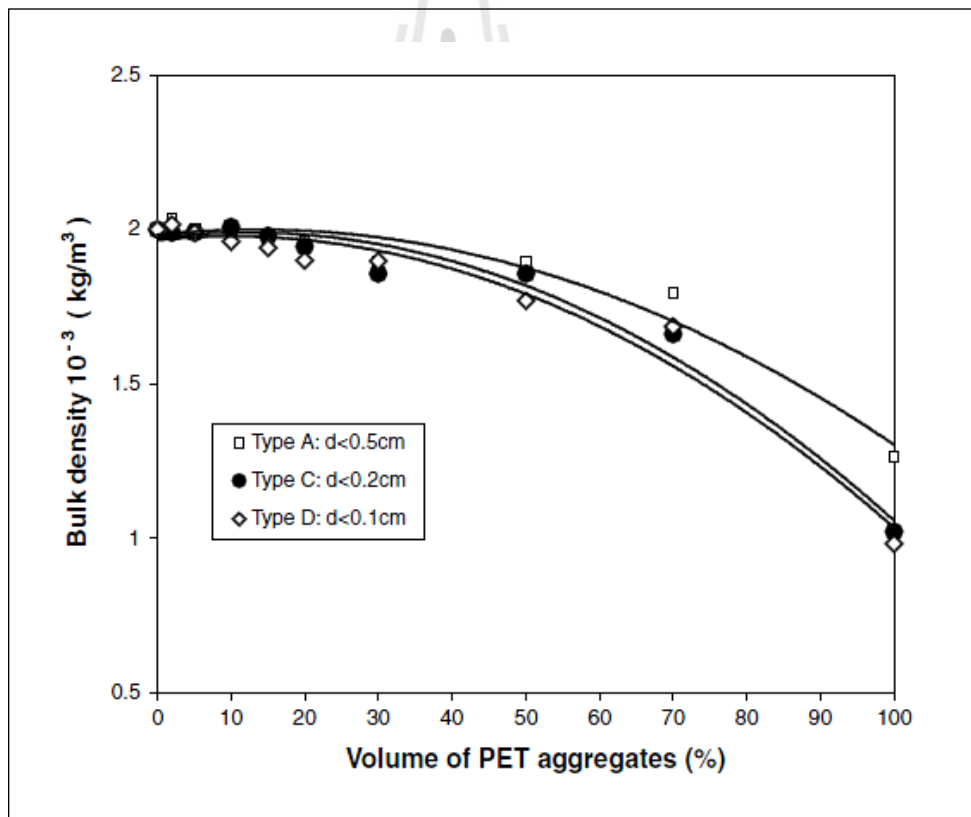
ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกลของคอนกรีตที่ได้รายงานในวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Reference	Density	Slump	Shrinkage	Compressive strength	Splitting tensile strength	Flexural strength	Elasticity modulus	Water absorption	Thermal conductivity
Choi	↓	↑	n/a	↓	↓	n/a	↓	n/a	n/a
Silva	n/a	n/a	n/a	n/e	n/e	n/e	n/e	n/a	n/a
Laukaitis	↓	n/a	n/a	↑	n/a	n/a	n/a	n/a	↑ (fine)
Marzouk	↓	n/a	↑	↓	↓	↓	↓	n/a	n/a
Butayneh	n/a	↓	n/a	↓	↓	↓	n/a	n/a	n/a
Panyakapo	↓	n/a	n/a	↓	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Ismail	↓	↓	n/a	↓	n/a	↓	n/a	n/a	n/a
Mounanga	↓	n/a	↑	↓	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Albano	n/a	↓	n/a	↓	↓	n/a	↓	↑	n/a
Choi	↓	↑	n/a	↓	↓	n/a	↓	↓	n/a
Yesilata	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	↓
Kou	↓	n/a	↓	↓	↓	n/a	↓	n/a	n/a
Kan	↓	n/a	n/a	↓	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Kan	↑	n/a	n/a	↑	n/a	n/a	n/a	n/a	↑
Remadnia	n/a	n/a	n/a	↓	↓	↓	n/a	n/a	n/a
Akcaozoglu	↓	n/a	n/a	↓	n/a	↓	n/a	↓	n/a
Kim	n/a	n/a	↑	↓	↓	n/a	↓	n/a	n/a
Asokan	n/a	n/a	n/a	↑	↑	n/a	n/a	↓	n/a
Hannawi	↓	n/a	n/a	↓	↓	↓	n/a	n/a	n/a
Fraj	n/a	n/a	↑	↓	n/a	n/a	↓	n/a	n/a
Frigione	n/a	n/a	n/a	↓	↓	n/a	n/a	n/a	n/a
Rahman	↓	n/a	n/a	↓	n/a	n/a	n/a	↓	n/a
Saikia	n/a	n/a	n/a	↓	↓	↓	↓	n/a	n/a

n/a: not applicable; n/e: not effect; ↓ : decrease; ↑ : increase

2.5.1 ความหนาแน่น

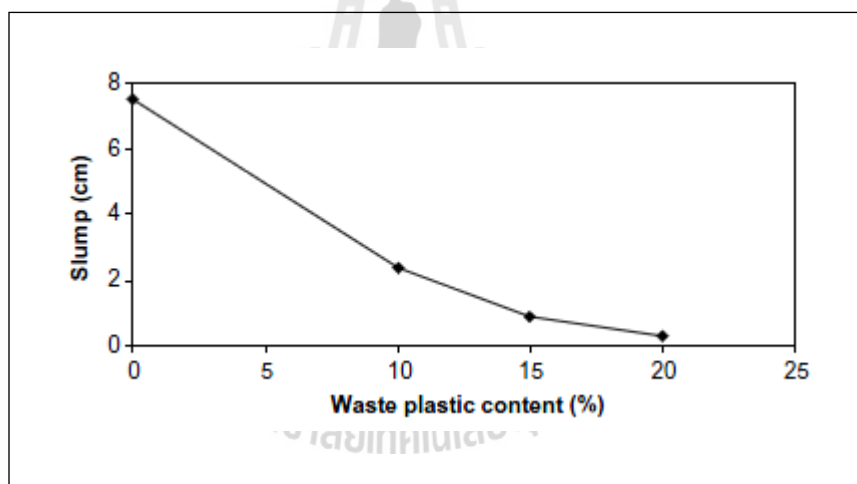
โดยส่วนใหญ่แล้ว การรีไซเคิลเศษพลาสติกโดยใช้เป็นวัสดุผสมรวมในงานคอนกรีต ไม่ว่าจะเป็นการแทนที่มวลรวมหยาบหรือมวลรวมละเอียดด้วยเศษพลาสติก ส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง เนื่องจากเศษพลาสติกมีค่าความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่าวัสดุผสมรวมธรรมชาติ ดังตัวอย่างงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วของ Marzouk et al. (2007) ได้รายงานการศึกษาการผสมเศษขวด PET ในมอร์ตาร์ ที่มีขนาดแตกต่างกันสามแบบ (A, C และ D) คือ ขนาดน้อยกว่า 0.5 0.2 และ 0.1 ซม. ตามลำดับ และการแทนที่ทรายร้อยละ 2 5 10 15 20 30 50 70 และ 100 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2.8 และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ผลการศึกษาพบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษขวด PET ที่เพิ่มขึ้น ให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความหนาแน่นของคอนกรีตผสมเศษขวด PET (Marzouk et al., 2007)

2.5.2 การยุบตัว

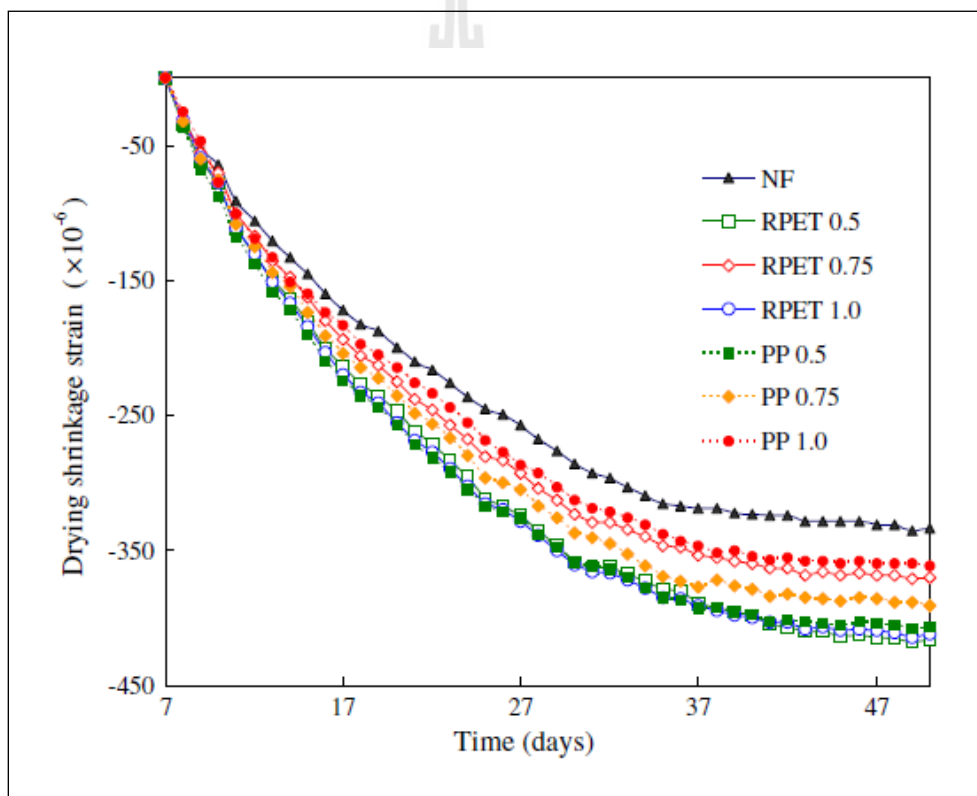
ตัวอย่างการเพิ่มขึ้นของเศษพลาสติกที่ทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตลดลง ดังงานวิจัยของ Ismail and Hashmi (2008) ได้รายงานการใช้เศษพลาสติกในคอนกรีต โดยการแทนที่มวลรวม ซึ่งเศษพลาสติกที่ใช้ประกอบด้วย โพลีเอทีลีนและโพลีสไตรีนร้อยละ 80 และ 20 ตามลำดับ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.53 และส่วนผสมทราย หินและซีเมนต์เท่ากับ 715 1020 และ 380 kg/m³ ตามลำดับ โดยการแทนที่ทรายด้วยเศษพลาสติกร้อยละ 10 15 และ 20 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษพลาสติกที่เพิ่มขึ้นร้อยละดังกล่าว ส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตลดลงร้อยละ 68.30 88.33 และ 95.33 ตามลำดับ ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ลดลงเนื่องจากความเป็นเหลี่ยมมุมและความไม่สม่ำเสมอของอนุภาคเศษพลาสติก ส่งผลให้การไหล (fluidity) ของคอนกรีตน้อย จึงทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตลดลง แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเศษพลาสติก (Ismail and Hashmi, 2008)

2.5.3 การหดตัวแห้ง

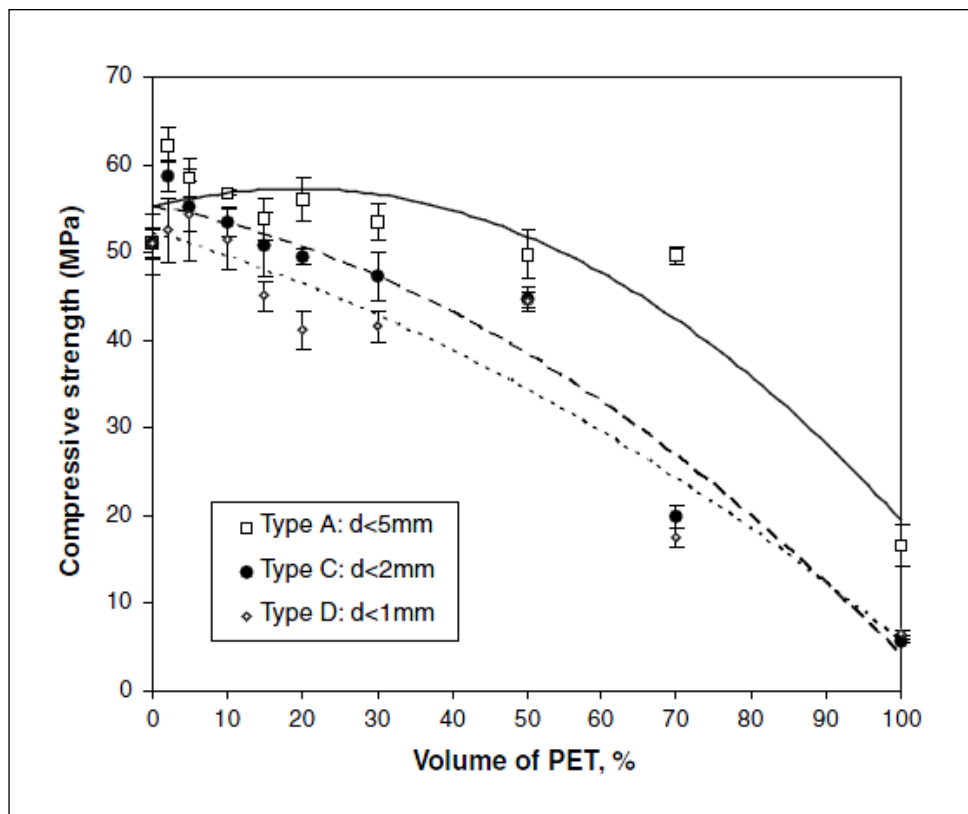
ตัวอย่างการเพิ่มขึ้นของเศษพลาสติกที่ทำให้ค่าการหดตัวแห้งของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ดังงานวิจัยของ Kim et al. (2010) ที่ได้รายงานการประเมินประสิทธิภาพของคอนกรีตผสมเส้นใย PET รีไซเคิล เปรียบเทียบกับเส้นใยโพรพิลีน (Polypropylene; PP) ที่สัดส่วนร้อยละ 0.5 0.75 และ 1.0 โดยปริมาตร และสัดส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานเท่ากับ 0.41 โดยเส้นใยทั้งคู่มีขนาดความยาวเท่ากับ 50 มิลลิเมตร จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของเศษเส้นใย PET และ PP ทำให้ค่าการหดตัวแห้งของคอนกรีตเพิ่มขึ้นร้อยละ 8-25 เนื่องจากการผสมเส้นใยพลาสติกทำให้เกิดช่องว่างในคอนกรีตมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการหดตัวแห้งของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ค่าการหดตัวแห้งของคอนกรีตผสมเศษเส้นใยพลาสติก (Kim et al., 2010)

2.5.4 กำลังรับแรงอัด

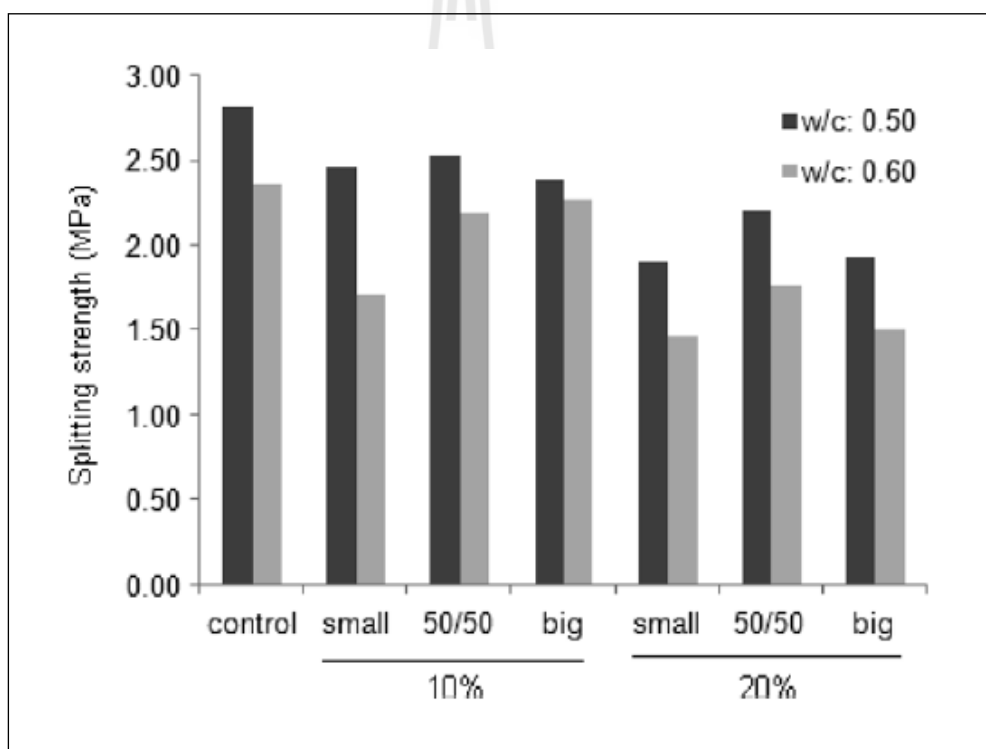
โดยส่วนใหญ่แล้ว การรีไซเคิลเศษพลาสติก โดยใช้เป็นวัสดุผสมรวมในงานคอนกรีต ไม่ว่าจะเป็นการแทนที่มวลรวมหยาบหรือมวลรวมละเอียดด้วยเศษพลาสติก ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง ดังตัวอย่างงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วของ Marzouk et al. (2007) ได้รายงานการศึกษาการผสมเศษขวด PET ในมอร์ตาร์ พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณเศษขวด PET ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงอีกด้วย แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเศษขวด PET (Marzouk et al., 2007)

2.5.5 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก

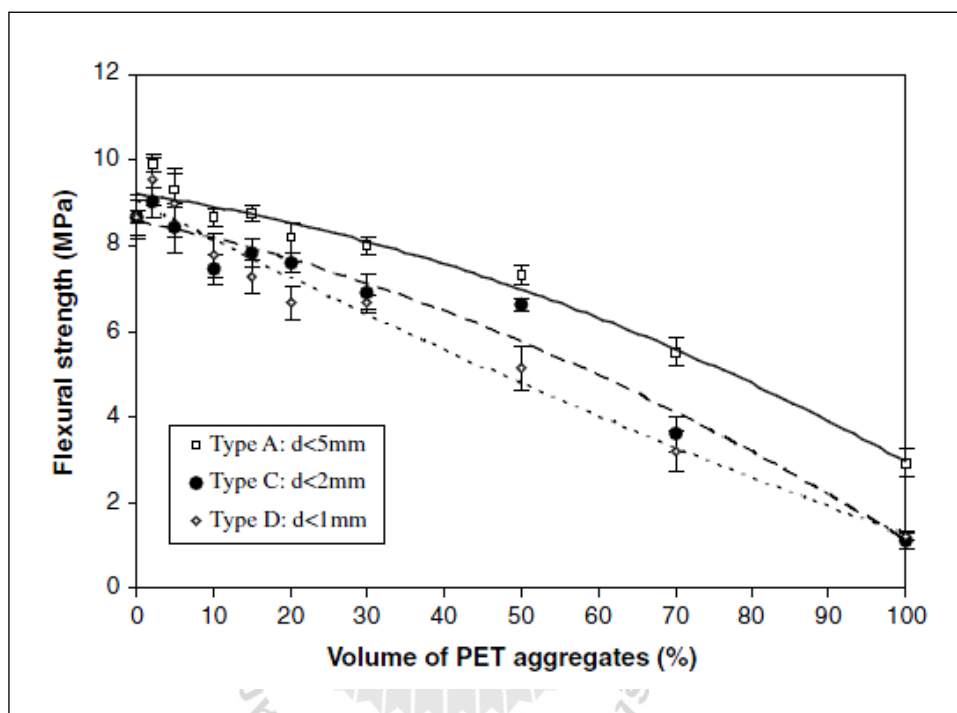
อีกทั้ง การรีไซเคิลเศษพลาสติกโดยใช้เป็นวัสดุผสมรวมในงานคอนกรีต ยังส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตลดลง ดังตัวอย่างงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วของ Albano et al. (2009) ได้รายงานการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคของเศษขวด PET ต่อคอนกรีต โดยมีสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต่างกัน ซึ่งขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเศษขวด PET ที่ใช้แตกต่างกันสองแบบคือ 0.26 และ 1.14 ซม. (แบบเล็กและแบบใหญ่ตามลำดับ) การแทนที่ทรายด้วยเศษขวด PET ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร และสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.50 และ 0.60 ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณเศษขวด PET และปริมาณน้ำในคอนกรีต ทำให้กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตลดลง แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตผสมเศษขวด PET (Albano et al., 2009)

2.5.6 กำลังรับแรงดัด

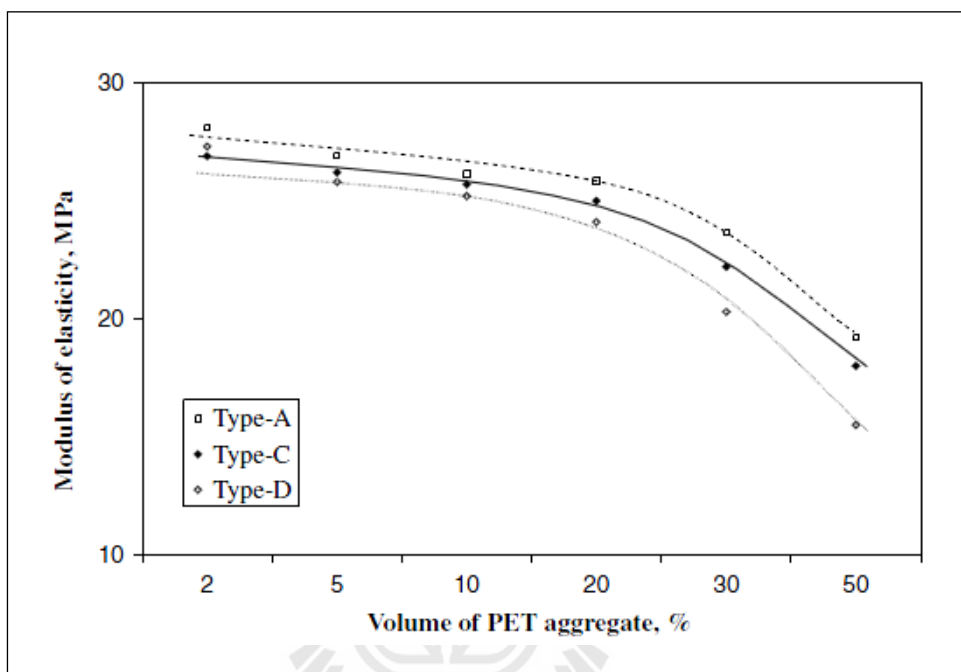
ในแง่ของกำลังรับแรงดัดมีความคล้ายกันกับกำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีก กล่าวคือ การรีไซเคิลเศษพลาสติกโดยใช้เป็นวัสดุผสมรวมในงานคอนกรีต ทำให้ค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตลดลง ดังตัวอย่างงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วของ Marzouk et al. (2007) พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณเศษขวด PET ทำให้กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตลดลง แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตผสมเศษขวด PET (Marzouk et al., 2007)

2.5.7 มอดูลัสยืดหยุ่น

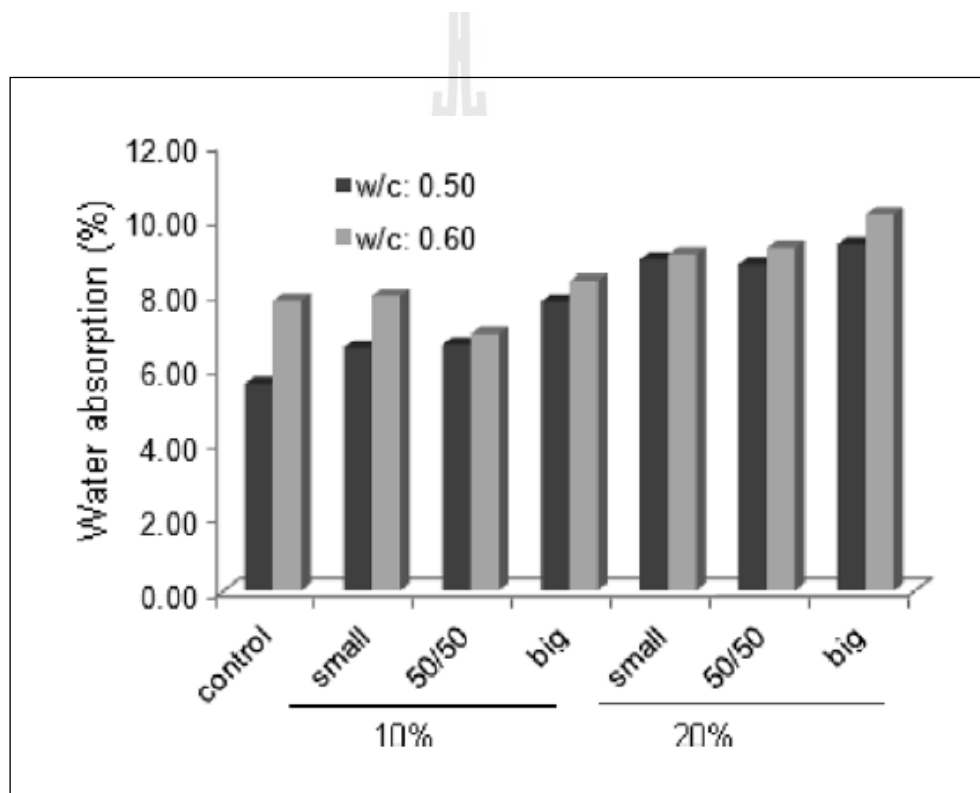
ซึ่งหากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเศษพลาสติกทำให้กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตลดลงดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นย่อมมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน ดังงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นของ Marzouk et al. (2007) แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 มอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเศษขวด PET (Marzouk et al., 2007)

2.5.8 การดูดซึมน้ำ

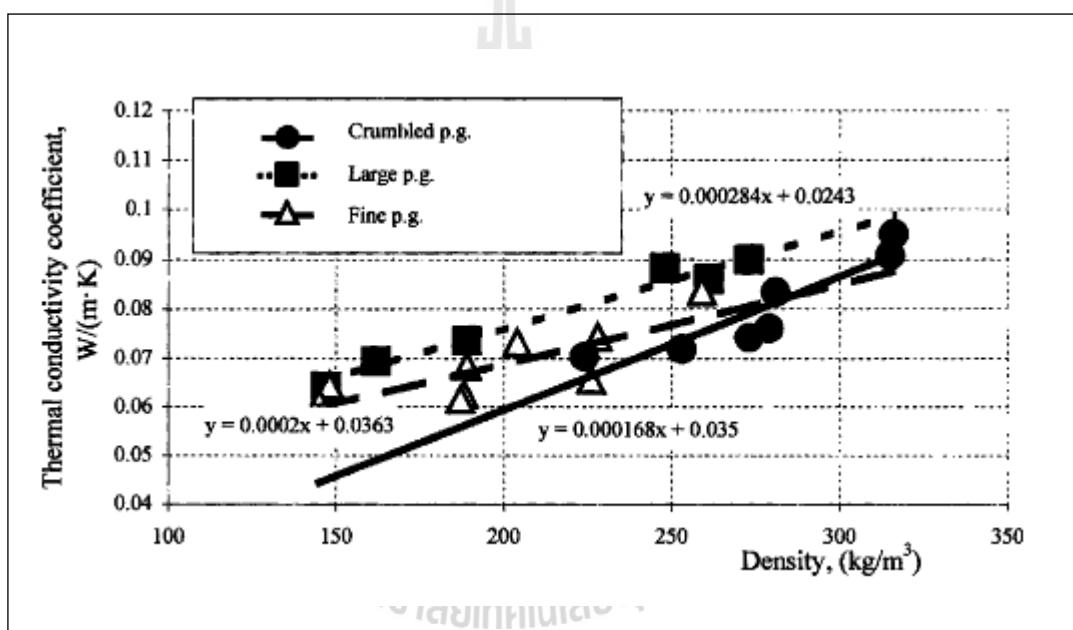
ตัวอย่างการเพิ่มขึ้นของเศษพลาสติกที่ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ดังงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วของ Albano et al. (2009) พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณเศษขวด PET และปริมาณน้ำในคอนกรีต ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เนื่องจากรูปร่างเหลี่ยมและ ไม่สม่ำเสมอของอนุภาคเศษขวด PET ทำให้เกิดช่องว่างในคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น เหตุผลดังกล่าว ทำให้ความพรุนของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้การดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากขนาด อนุภาคที่ใหญ่ขึ้นของเศษขวด PET ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตผสมเศษขวด PET (Albano et al., 2009)

2.5.9 การนำความร้อน

ตัวอย่างการนำความร้อนของคอนกรีตผสมเศษพลาสติก ดังงานวิจัยของ Laukaitis et al. (2005) ได้รายงานการศึกษาผลกระทบของเม็ดโพลีสไตรีน (polystyrene) ต่อคอนกรีตผสม โดยทำการศึกษามเม็ดโพลีสไตรีนที่แตกต่างกันสามแบบคือ แบบเม็ดใหญ่ (large) แบบเม็ดร่วน (crumbled) และแบบเม็ดละเอียด (fine) ที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเม็ดโพลีสไตรีนเท่ากับ 1:1 1:1.5 1:2 1:2.5 และ 1:3 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า ขนาดของเศษพลาสติก ส่งผลต่อการนำความร้อนของคอนกรีต กล่าวคือ เม็ดโพลีสไตรีนแบบร่วนส่งผลให้คอนกรีตมีค่าการนำความร้อนน้อยกว่าแบบละเอียดและแบบใหญ่ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การนำความร้อนของคอนกรีตผสมเศษเม็ดโพลีสไตรีน (Laukaitis et al., 2005)

2.6 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (design of experiment; DOE) เป็นการออกแบบเพื่อหาตัวแปรอิสระหรือปัจจัย (independent variables or factors, X) ที่มีผลต่อตัวแปรตามหรือผลตอบสนอง (responses or outputs, Y) โดยลดความแปรปรวนของผลตอบสนองและให้ผลตอบสนองอยู่ในเป้าหมาย (target) ของการออกแบบการทดลองมากที่สุด ซึ่งอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนองเชิงสถิติของ Y และ X อีกทั้งสามารถศึกษาผลของหลาย ๆ ปัจจัยพร้อมกัน ด้วยจำนวนการทดลองที่น้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัย การออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของปัจจัยอย่างมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองที่เกิดขึ้น (ชาญณรงค์ สายแก้ว, 2557)

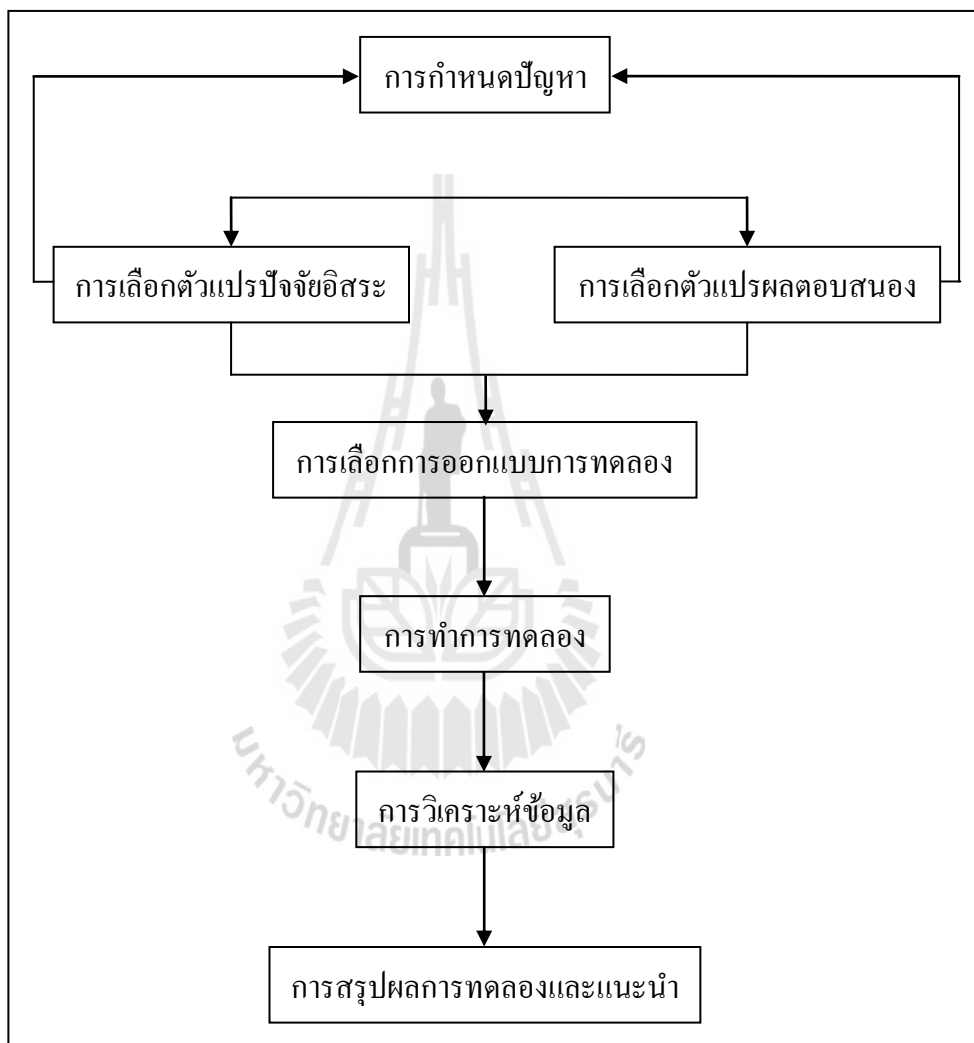
2.6.1 หลักการพื้นฐานในการออกแบบการทดลอง

ชาญณรงค์ สายแก้ว (2557) กล่าวว่า การออกแบบการทดลองที่ดีแสดงถึงการได้มาซึ่งข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ นำไปสู่การวิเคราะห์และการสรุปผลที่แม่นยำ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในการทำงานวิจัยเชิงการทดลอง โดยมีหลักการพื้นฐาน 3 ประการ ดังนี้

- 1) การสุ่ม (randomization) คือ การทดลองที่ปราศจากความลำเอียง ไม่มีการเจาะจงในการทำการทดลอง ซึ่งทำให้ความคลาดเคลื่อนมีการกระจายอิสระและไม่สัมพันธ์ต่อกัน
- 2) การทำการทดลองซ้ำ (replication) คือ การกำหนดจำนวนการทำซ้ำของการทดลอง ซึ่งจะต้องเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งทำให้ความคลาดเคลื่อนในการทดลองลดน้อยลง
- 3) การจัดกลุ่ม (blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการจัดสิ่งๆ ที่เหมือนกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน เพื่อลดความผันแปรจากความแตกต่างของหน่วยตัวอย่าง

2.6.2 รูปแบบการออกแบบการทดลอง

Montgomery (2012) เสนอแนวทางการออกแบบการทดลองประกอบด้วย 6 ขั้นตอน คือ การกำหนดปัญหา การกำหนดตัวแปร การเลือกการออกแบบการทดลอง การทำการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูล และการสรุปผลการทดลองและแนะนำ แสดงดังรูปที่ 2.14



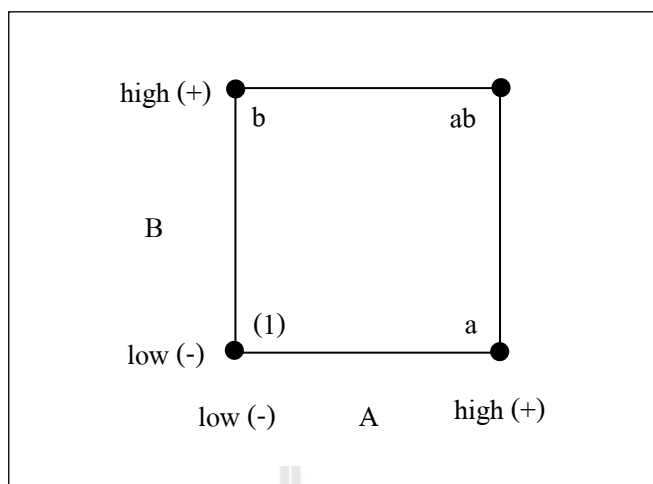
รูปที่ 2.14 รูปแบบของการออกแบบการทดลอง

2.6.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k แฟกทอเรียล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (experiments of factorial design) หมายถึง การทดลองที่ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยตั้งแต่สองปัจจัยขึ้นไป ซึ่งพิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยทั้งหมดที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนองและหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยในการทดลองนั้น การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ ได้แก่ ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากอันตรกิริยาของปัจจัยที่ก่อให้เกิดข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ เนื่องจากเป็นการออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองทีละปัจจัย และทำให้เราสามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่าง ๆ ของปัจจัยอื่นได้ รวมทั้งทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลต่อเนื่องกันของการทดลองได้ ซึ่งการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ ในส่วนของงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะทำการศึกษากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k แฟกทอเรียล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k แฟกทอเรียล มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบตั้งแต่สองปัจจัยขึ้นไป โดยศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลัก (main effects) และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (interaction effects) ที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ โดยศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (linear model) ตัวอย่างการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k แฟกทอเรียล ในรูปแบบที่ง่ายที่สุดประกอบด้วย 2 ปัจจัย (A และ B) แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ (ต่ำและสูง) แผนการทดลองนี้เรียกว่า การทดลองแบบ 2^2 แฟกทอเรียล นั่นคือ 4 ทริทเมนต์ คอมบิเนชัน โดยปกติเราจะแสดงผลของปัจจัยด้วยตัวอักษรลาตินตัวใหญ่ ดังนั้น A จะแทนผลของปัจจัย A, B แทนผลของปัจจัย B และ AB แทนอันตรกิริยาของปัจจัย AB ในการออกแบบ 2^2 ระดับต่ำและสูง จะแทนด้วยเครื่องหมาย “-” และ “+” บนแกน A และ B ตามลำดับ

การทดลองปัจจัยรวมทั้ง 4 สำหรับการออกแบบนี้จะแทนด้วยตัวอักษรตัวเล็กจะเห็นได้ว่า สำหรับระดับสูงของปัจจัยใด ๆ จะแทนด้วยตัวอักษรตัวเล็กของปัจจัยนั้น ในการทดลองร่วมปัจจัยที่เกิดขึ้น สำหรับระดับต่ำจะไม่ปรากฏตัวอักษรใด ๆ ในการทดลองร่วมปัจจัย ดังนั้น สำหรับการทดลองแบบ 2^2 แฟกทอเรียล ในที่นี้ a จะแทนการทดลองร่วมปัจจัยของปัจจัย A ที่ระดับสูง และ B ที่ระดับต่ำ, b แทน A ที่ระดับต่ำและ B ที่ระดับสูง, ab แทนทั้งปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับสูง และ (1) แทนทั้งปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับต่ำ แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงการทดลองร่วมปัจจัยของการออกแบบ 2^2 แฟกทอเรียล

ผลรวมกำลังสองสำหรับอิทธิพลหลัก (sum of squares for the main effects) และผลรวมกำลังสองสำหรับอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (sum of squares for the main effects) ของการทดลองแบบ 2^2 แฟกทอเรียล สามารถคำนวณได้จากค่าอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย โดยเครื่องหมาย “-” และ “+” จะถูกใส่ในแต่ละทริทเมนต์คอมบิเนชันตามอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงการออกแบบการทดลองที่ 2 ปัจจัยในระดับสูงและต่ำ

ทริทเมนต์คอมบิเนชัน	อิทธิพลของปัจจัย		
	A	B	AB
(1)	-	-	+
a	+	-	-
b	-	+	-
ab	+	+	+

จากตารางสามารถคำนวณอิทธิพลของปัจจัยหลัก A ได้จากผลต่างของค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองระดับสูงและระดับต่ำ โดยพิจารณาจากคอลัมน์ของปัจจัยหลัก A ดังสมการที่ (2.4)

$$\begin{aligned} A &= \bar{y}_{A^+} - \bar{y}_{A^-} \\ &= \frac{ab+a}{2n} - \frac{b+(1)}{2n} \\ &= \frac{1}{2n} \{ab+a-b-(1)\} \end{aligned} \quad (2.4)$$

เมื่อ n = จำนวนซ้ำของค่า $ab+a-b-(1)$ เรียกว่า contrast (A)

ในทำนองเดียวกัน อิทธิพลของปัจจัยหลัก B ได้จากผลต่างของค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองระดับสูงและระดับต่ำ โดยพิจารณาจากคอลัมน์ของปัจจัยหลัก B ดังสมการที่ (2.5)

$$\begin{aligned} B &= \bar{y}_{B^+} - \bar{y}_{B^-} \\ &= \frac{ab+b}{2n} - \frac{a+(1)}{2n} \\ &= \frac{1}{2n} \{ab+b-a-(1)\} \end{aligned} \quad (2.5)$$

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

และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย AB ได้จากผลต่างของค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองระดับสูงและระดับต่ำ โดยพิจารณาจากคอลัมน์ของปัจจัยหลัก AB ดังสมการที่ (2.2)

$$\begin{aligned} AB &= \frac{ab+(1)}{2n} - \frac{a+b}{2n} \\ &= \frac{1}{2n} \{ab+(1)-a-b\} \end{aligned} \quad (2.6)$$

เมื่อ n = จำนวนซ้ำของค่า $ab+(1)-a-b$ เรียกว่า contrast (AB)

อีกทั้งผลรวมกำลังสอง (sum of squares; SS) สำหรับแต่ละอิทธิพลหาได้จากสมการที่ (2.7)

$$SS = \frac{(\text{contrast})^2}{2^2 \times n} \quad (2.7)$$

ผลรวมกำลังสองทั้งหมด (total sum of squares; SS_T) หาได้จากสมการที่ (2.8)

$$SS_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{2^2 \times n} \quad (2.8)$$

ผลรวมกำลังสองสำหรับอิทธิพลหลัก (sum of squares for the main effects) ของปัจจัย A และ B หาได้จากสมการที่ (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ

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

$$SS_B = \frac{[ab + b - a - (1)]^2}{2^2 \times n} \quad (2.10)$$

ผลรวมกำลังสองสำหรับอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (sum of squares for the interaction effects) ของปัจจัย AB หาได้จากสมการที่ (2.11)

$$SS_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b]^2}{2^2 \times n} \quad (2.11)$$

และผลรวมกำลังสองสำหรับความคลาดเคลื่อน (sum of squares error) ของปัจจัย AB หาได้จากสมการที่ (2.12)

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (2.12)$$

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^2 แฟกทอเรียล แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การออกแบบการทดลองที่ 2 ปัจจัยในระดับสูงและต่ำ

Source of variation	Sum of squares	Degree of freedom	Mean squares; MS	F-value
A	SS_A	1	$\frac{SS_A}{1} = MS_A$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	1	$\frac{SS_B}{1} = MS_B$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	1	$\frac{SS_{AB}}{1} = MS_{AB}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E	$2^k(n-1)$	$\frac{SS_E}{2^k(n-1)} = MS_E$	
Total	SS_T	$(2^k \times n) - 1$		

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^2 แฟกทอเรียล มีรูปแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นแบบพหุ (linear regression model) แสดงดังสมการ (2.13)

$$y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \varepsilon \quad (2.13)$$

โดยที่

y = ผลตอบสนอง

A = ปัจจัยหลัก A

B = ปัจจัยหลัก B

β_0 = ค่าคงที่ของสัมประสิทธิ์การถดถอย

β_1 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยหลัก A

β_2 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยหลัก B

ε = ค่าความคลาดเคลื่อนของผลตอบสนอง y

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย β_0 , β_1 และ β_2 หรือแม้แต่ β_j ของรูปแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นแบบพหุ สามารถหาได้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least squares) โดยให้ผลรวมกำลังสองระหว่างค่าผลตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (y_i) กับค่าประมาณจากความสัมพันธ์แบบเส้นตรงที่มีค่าน้อยที่สุด (\hat{y}_i) สามารถเขียนให้อยู่ในรูป i, j และ k ได้ดังสมการ (2.14)

$$\begin{aligned} y_i &= \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \\ &= \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i, \quad i=1,2,\dots,n \end{aligned} \quad (2.14)$$

โดยมีฟังก์ชันกำลังสองน้อยที่สุด ดังสมการที่ (2.15)

$$\begin{aligned} S(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k) &= \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \\ &= \sum_{i=1}^n \left(y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.15)$$

โดยจะทำให้ฟังก์ชัน S ที่มีค่าน้อยที่สุด เพื่อให้สอดคล้องกับค่าประมาณกำลังสองน้อยที่สุดของ $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ ดังสมการที่ (2.16) และ (2.17)

$$\left. \frac{\partial S}{\partial \beta_0} \right|_{\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k} = -2 \sum_{i=1}^n \left(y_i - \hat{\beta}_0 - \sum_{j=1}^k \hat{\beta}_j x_{ij} \right) = 0 \quad (2.16)$$

และ

$$\left. \frac{\partial S}{\partial \beta_0} \right|_{\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k} = -2 \sum_{i=1}^n \left(y_i - \hat{\beta}_0 - \sum_{j=1}^k \hat{\beta}_j x_{ij} \right) x_{ij} = 0, \quad j=1,2,\dots,k \quad (2.17)$$

จะได้สมการกำลังสองน้อยที่สุดแบบปกติ (least squares normal equations) ดังสมการที่ (2.18)

$$\begin{aligned}
 n\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_{i1} + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n x_{i2} + \dots + \hat{\beta}_k \sum_{i=1}^n x_{ik} &= \sum_{i=1}^n y_i \\
 \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n x_{i1} + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} + \dots + \hat{\beta}_k \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{ik} &= \sum_{i=1}^n x_{i1}y_i \\
 \vdots & \vdots \\
 \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n x_{ik} + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i1} + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i2} + \dots + \hat{\beta}_k \sum_{i=1}^n x_{ik}^2 &= \sum_{i=1}^n x_{ik}y_i
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

จะสังเกตเห็นได้ว่า จำนวนสมการปกติ $p = k + 1$ โดยในแต่ละสมการปกติแทนสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ไม่ทราบค่า ซึ่งผลลัพธ์จากสมการปกติคือ ค่าประมาณกำลังสองน้อยที่สุดของแทนสัมประสิทธิ์การถดถอย $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$

เพื่อให้ง่ายและกระชับในการแก้สมการ สามารถเขียนรูปแบบการถดถอยเชิงพหุในรูปเมตริกซ์ โดยเมตริกเขียนแทนด้วยตัวพิมพ์ใหญ่แบบหนา ขณะที่เวกเตอร์เขียนแทนด้วยตัวพิมพ์เล็กแบบหนา ดังสมการที่ (2.19)

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \tag{2.19}$$

โดยที่

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

โดยทั่วไป \mathbf{y} เป็นเวกเตอร์ ($n \times 1$) ของผลตอบสนอง, \mathbf{X} เป็นเมตริกซ์ขนาด ($n \times p$) ของระดับตัวแปรอิสระ, β เป็นเวกเตอร์ ($p \times 1$) ของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย และ ε เป็นเวกเตอร์ ($n \times 1$) ของความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม ดังนั้นเวกเตอร์ของค่าประมาณกำลังสองน้อยที่สุด $\hat{\beta}$ แสดงดังสมการที่ (2.20)

$$S(\beta) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \varepsilon' \varepsilon = (\mathbf{y} - \mathbf{X}\beta)'(\mathbf{y} - \mathbf{X}\beta) \quad (2.20)$$

และสามารถจัดให้อยู่ในรูป $S(\beta)$ แสดงดังสมการที่ (2.21)

$$\begin{aligned} S(\beta) &= \mathbf{y}'\mathbf{y} - \beta'\mathbf{X}'\mathbf{y} - \mathbf{y}'\mathbf{X}\beta + \beta'\mathbf{X}'\mathbf{X}\beta \\ &= \mathbf{y}'\mathbf{y} - 2\beta'\mathbf{X}'\mathbf{y} + \beta'\mathbf{X}'\mathbf{X}\beta \end{aligned} \quad (2.21)$$

เมื่อ $\beta'\mathbf{X}'\mathbf{y}$ เป็นเมตริกซ์ขนาด (1×1) หรือเป็นสเกลาร์ โดยมีค่าทรานสโพสเป็น $(\beta'\mathbf{X}'\mathbf{y}) = \mathbf{y}'\mathbf{X}\beta$ ซึ่งก็เป็นเป็นสเกลาร์ ดังนั้นตัวประมาณกำลังสองน้อยที่สุด แสดงดังสมการที่ (2.22)

$$\left. \frac{\partial S}{\partial \beta} \right|_{\hat{\beta}} = -2\mathbf{X}'\mathbf{y} + 2\mathbf{X}'\mathbf{X}\hat{\beta} = 0 \quad (2.22)$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายเป็น

$$\mathbf{X}'\mathbf{X}\hat{\beta} = \mathbf{X}'\mathbf{y} \quad (2.23)$$

ซึ่งสมการที่ (2.23) ก็คือ สมการกำลังสองน้อยที่สุดแบบปกติเหมือนกันกับสมการ (2.22) สำหรับการแก้สมการปกติของสมการที่ (2.23) ต้องคูณทั้งสองข้างด้วยค่าผกผันของ $\mathbf{X}'\mathbf{X}$ จะได้ค่าประมาณกำลังสองน้อยที่สุดของ $\hat{\beta}$ ดังสมการที่ (2.24)

$$\hat{\beta} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}'\mathbf{y} \quad (2.24)$$

สำหรับการประเมินความเพียงพอของรูปแบบการถดถอยแบบพหุ สามารถประเมินได้จากสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด R^2 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $0 \leq R^2 \leq 1$ โดยหาได้จากสมการ (2.25)

$$R^2 = \frac{SS_R}{S_{yy}} = 1 - \frac{SS_E}{S_{yy}} \quad (2.25)$$

เนื่องจาก R^2 คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบพหุระหว่างค่าตอบสนอง y และ ปัจจัย x_1, x_2, \dots, x_k ซึ่งมักมีค่าเพิ่มขึ้นหากจำนวนปัจจัยเพิ่มขึ้น ดังนั้นผู้วิเคราะห์บางท่านจึงมักนิยมใช้ สัมประสิทธิ์ตัวกำหนดที่ปรับแล้ว (adjusted coefficient of determination; R_{adj}^2) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.26)

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SS_E / (n - p)}{S_{yy} / (n - 1)} = 1 - \left[\frac{n - 1}{n - p} \right] (1 - R^2) \quad (2.26)$$

ค่า R^2 และค่า R_{adj}^2 ควรมีค่าใกล้เคียงกัน ถ้าค่าทั้งสองแตกต่างกันมาก แสดงว่ามีตัวแปรที่ไม่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองอยู่ในรูปแบบการถดถอยแบบพหุ

3.1 วัสดุ (Materials)

3.1.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งหรือที่เรียกกันว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (ordinary portland cement; OPC) ตามมาตรฐาน ASTM C150

3.1.2 เถ้าลอย

เถ้าลอย (fly ash; FA) ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง ประเทศไทย ซึ่งจัดอยู่ในเถ้าลอยชนิด C ตามมาตรฐาน ASTM C618

3.1.3 ทราย

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ทรายแม่น้ำ (river sand) ซึ่งร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16

3.1.4 เศษเมลามีน

เศษเมลามีน (melamine formaldehyde waste; MFW) ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ

1) เศษเม็ดเมลามีน (melamine formaldehyde waste granule; MFG) คือเศษเมลามีนที่ได้จากการบดย่อยเศษครีปเมลามีน (melamine scrap) ตรงบริเวณขอบผลิตภัณฑ์เมลามีนจากกระบวนการผลิตของบริษัทศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน) แสดงดังรูปที่ 3.1 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

2) เศษฝุ่นเมลามีน (melamine formaldehyde waste powder; MFP) เป็นเศษเมลามีนที่ได้จากกระบวนการตัดตกแต่งบริเวณขอบผลิตภัณฑ์เมลามีน แสดงดังรูปที่ 3.1 (ค) และ (ง) ตามลำดับ

3.1.5 น้ำ

น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตคือ น้ำประปาสะอาดปราศจากสารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต

3.1.6 สารก่อโฟม

สารก่อโฟม (foaming agent) ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นสารก่อโฟมชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตรสารเพิ่มฟองเพื่อการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC สูตร 1 ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก ชีรวัฒน์ สีนศิริ และคณะ (2554)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

จากปรีทศวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ดังที่ได้ศึกษาในบทที่ 2 นำมาสู่วิธีการดำเนินงาน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการรีไซเคิลเศษเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์โดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายบางส่วนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ ซึ่งรายละเอียดวิธีการดำเนินงานวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

- 3.1 วัสดุ
- 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์
- 3.3 การทดสอบสมบัติของวัสดุ
- 3.4 การวิเคราะห์ระดับจุลภาค
- 3.5 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
- 3.6 การทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
- 3.7 การวิเคราะห์การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 แฟกทอเรียล
- 3.8 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุ (Materials)

3.1.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งหรือที่เรียกกันว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (ordinary portland cement; OPC) ตามมาตรฐาน ASTM C150

3.1.2 เถ้าลอย

เถ้าลอย (fly ash; FA) ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง ประเทศไทย ซึ่งจัดอยู่ในเถ้าลอยชนิด C ตามมาตรฐาน ASTM C618

3.1.3 ทราย

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ทรายแม่น้ำ (river sand) ซึ่งร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16

3.1.4 เศษเมลามีน

เศษเมลามีน (melamine formaldehyde waste; MFW) ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ

1) เศษเม็ดเมลามีน (melamine formaldehyde waste granule; MFG) คือเศษเมลามีนที่ได้จากการบดย่อยเศษครีปเมลามีน (melamine scrap) ตรงบริเวณขอบผลิตภัณฑ์เมลามีนจากกระบวนการผลิตของบริษัทศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน) แสดงดังรูปที่ 3.1 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

2) เศษฝุ่นเมลามีน (melamine formaldehyde waste powder; MFP) เป็นเศษเมลามีนที่ได้จากกระบวนการตัดตกแต่งบริเวณขอบผลิตภัณฑ์เมลามีน แสดงดังรูปที่ 3.1 (ค) และ (ง) ตามลำดับ

3.1.5 น้ำ

น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตคือ น้ำประปาสะอาดปราศจากสารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต

3.1.6 สารก่อโฟม

สารก่อโฟม (foaming agent) ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นสารก่อโฟมชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตรสารเพิ่มฟองเพื่อการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC สูตร 1 ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก ชีรวัฒน์ สินศิริ และคณะ (2554)



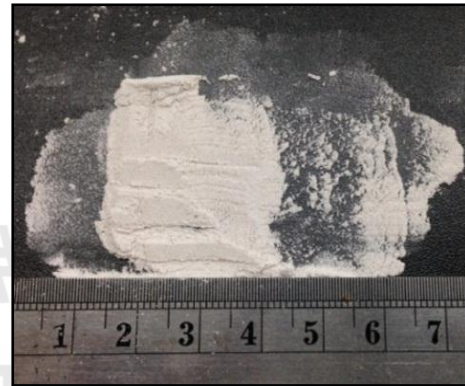
(ก) เศษครีบบเมลามีนที่ได้จากโรงงาน



(ข) เศษเม็ดเมลามีน



(ค) เศษฝุ่นเมลามีนที่ได้จากโรงงาน



(ง) เศษฝุ่นเมลามีน

รูปที่ 3.1 เศษเมลามีนที่ใช้ในงานวิจัย

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องบดย่อยพลาสติก

เครื่องบดย่อยพลาสติก (plastic recycling machinery) รุ่น DK-5953 ใช้ในการบดย่อยเศษครีบบเมลามีนโดยกระบวนการบดเชิงกล เพื่อบดย่อยเศษครีบบเมลามีนให้เป็นชิ้นเล็ก นำไปสู่เศษเม็ดเมลามีนที่ใช้ในการผสมคอนกรีตมวลเบา แสดงดังรูปที่ 3.2 (ก)

3.2.2 เครื่องร่อนแยกขนาด

เครื่องร่อน (sieve shaker) ยี่ห้อ Retsch รุ่น AS200 พร้อมชุดตะแกรงร่อน (sieve) มาตรฐาน ASTM E11 ใช้ในการร่อนเศษฝุ่นเมลามีนเพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมออกจากเศษฝุ่นเมลามีนก่อนนำไปผสมคอนกรีตมวลเบา ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ข)



(ก) เครื่องบดย่อยเศษครีบบเมลามีน

(ข) เครื่องร่อนเศษฝุ่นเมลามีน

รูปที่ 3.2 เครื่องบดย่อยเศษครีบบเมลามีนและเครื่องร่อนเศษฝุ่นเมลามีน

3.2.3 เครื่องผสม

เครื่องผสม (mixer) คอนกรีตมวลเบาที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นแบบ โม่ผสมเอียง (tilting drum mixer) ที่สร้างขึ้นเฉพาะ เพื่อความเหมาะสมกับปริมาณการผสมและความสะดวกในการใช้งาน โดยตัวโม่ (drum) ทำจากถังพลาสติกบรรจุสารเคมีที่ผ่านการใช้งานแล้วซึ่งหาซื้อได้ทั่วไป เป็นถังพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene) ปริมาตร 120 ลิตร ความเอียงถังผสมประมาณ 22 องศา และมีใบกวนอยู่ภายใน เครื่องผสมนี้สามารถเอียงโม่ลงสำหรับการเทคอนกรีตออกได้ ซึ่งการคายคอนกรีตสามารถทำได้รวดเร็วและไม่เกิดการแยกตัว ความจุในการผสมสูงสุดครั้งละไม่เกิน 0.025 ลูกบาศก์เมตร ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1/2 แรงม้า หมุนด้วยความเร็ว 1450 รอบต่อนาที โดยต่อพูลเลย์ขับเข้ากับพูลเลย์ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 และ 6 นิ้ว ตามลำดับ พร้อมทั้งทรอบความเร็วด้วยชุดเกียร์ทรอบ (worm gear unit) อัตราทด 1:50 ทำให้เครื่องผสมมีอัตราการหมุนของถังผสมอยู่ที่ 12 รอบต่อนาที ลักษณะเครื่องผสมแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องผสมคอนกรีตมวลเบาเซลล์ลูการ์

3.2.4 เครื่องสร้างโฟม

เครื่องสร้างโฟม (foam generator) เป็นเครื่องกำเนิดฟองชนิดตั้งอัดอากาศสำหรับคอนกรีตมวลเบา ระบบเซลล์ดูต้า ชนิดถังแรงดัน ใช้คู่กับเครื่องอัดอากาศ ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ, คำภี จิตชัยภูมิ, และปริญญา จินดาประเสริฐ (2553) ลักษณะเครื่องสร้างโฟม ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือตัวปรับแรงดันเข้าถัง (regulator) เพื่อให้ความดันภายในถังคงที่ 0.6 เมกะปาสกาล และอุปกรณ์ผสมสารก่อโฟมกับน้ำซึ่งจะให้ฟองโฟมจำนวนมาก ที่ได้จากการใส่สารก่อโฟมเจือจางกับน้ำในสัดส่วน สารก่อฟองโฟมต่อน้ำ 1 : 40 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องสร้างโฟม

3.2.5 เครื่องอัดอากาศ

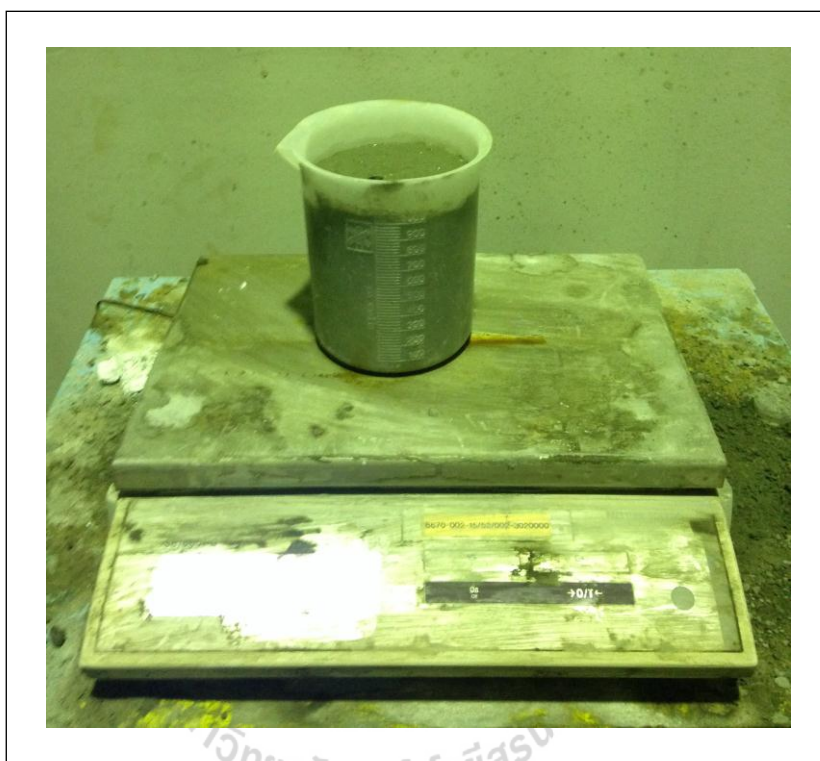
เครื่องอัดอากาศ (air compressor) ใช้คู่กับเครื่องสร้างโฟมชนิดถังแรงดันทำหน้าที่อัดอากาศเข้าในถังของเครื่องสร้างโฟม มีขนาดปริมาตรถังโตกว่าเครื่องสร้างฟอง 4 เท่า ซึ่งตั้งความดันอยู่ในช่วง 0.4-0.7 เมกะปาสกาล แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องอัดอากาศที่ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดโฟม

3.2.6 ภาชนะและเครื่องชั่งน้ำหนักคอนกรีตสด

การทดสอบหาความหนาแน่นของคอนกรีตสด ทำได้โดยชั่งน้ำหนักของคอนกรีตสดในภาชนะ (container) ที่ทราบปริมาตร ขนาดภาชนะที่ใช้มีปริมาตร 1 ลิตร โดยชั่งน้ำหนักคำนวณหาความหนาแน่นของคอนกรีตสด ซึ่งความหนาแน่นของคอนกรีตคืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของคอนกรีตสดต่อปริมาตรของภาชนะ มีหน่วยเป็น กก./ม.³ แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ภาชนะและเครื่องชั่งน้ำหนักคอนกรีตสด

3.2.7 แบบหล่อมาตรฐาน

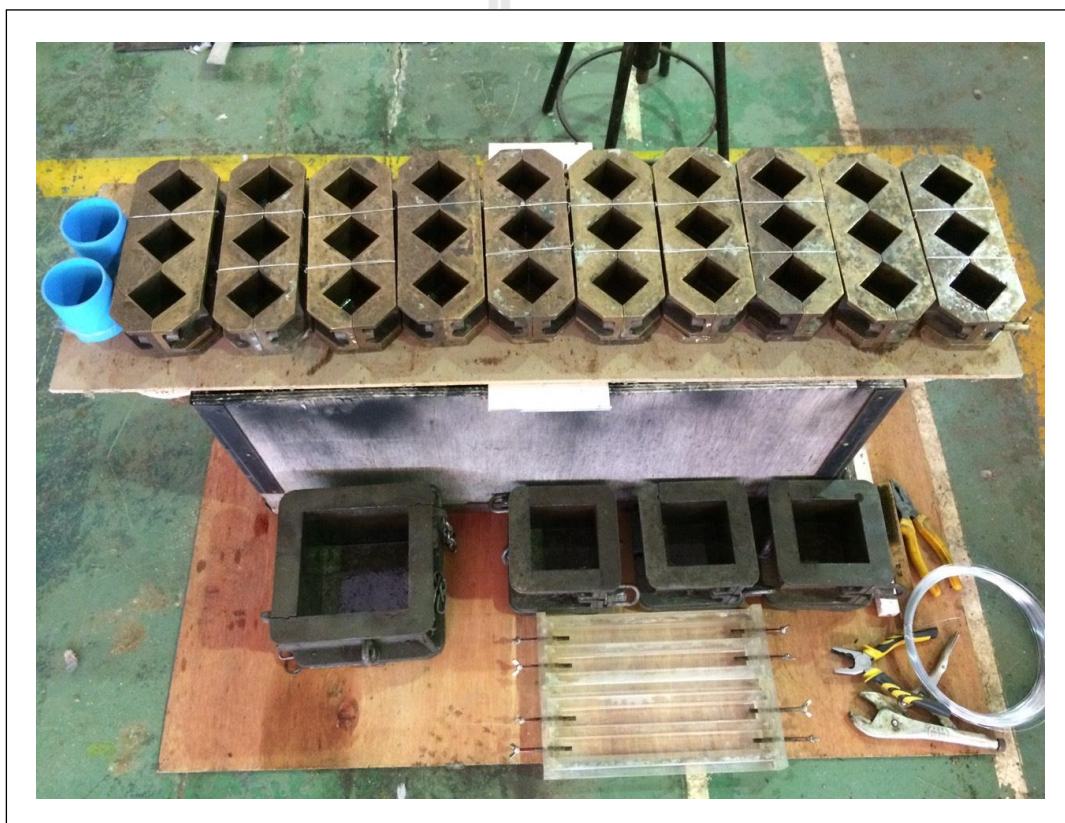
แบบหล่อขึ้นทดสอบคอนกรีตมวลเซลลูลาร์ ตามมาตรฐาน BS 1881 แสดงดังรูปที่

3.7 ประกอบด้วย

1) แบบหล่อที่ทำจากท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 69 มม. สูง 75 มม. สำหรับ
หล่อขึ้นทดสอบการนำความร้อน

2) แบบหล่อมาตรฐานขนาด 50×50×50 มม. สำหรับหล่อขึ้นทดสอบกำลัง
รับแรงอัด

3) แบบหล่อมาตรฐานขนาด 100×100×100 มม. สำหรับหล่อขึ้นทดสอบการดูดซึมน้ำ



รูปที่ 3.7 แบบหล่อคอนกรีตมวลเบามาตรฐาน

3.2.8 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัด ใช้เครื่องทดสอบรุ่น ELE กำลังสูงสุด 200 ตัน ทดสอบ โดยให้แรงกดที่ผิวด้านหน้าในทิศตั้งฉากกับแนวแรง ที่อัตราความเค้นคงที่ 0.4 เมกะพาสกัลต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

3.2.9 ตู้อบลมร้อน

ตู้อบลมร้อน (hot air oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น BE-200 สามารถตั้งอุณหภูมิและเวลา สำหรับการอบวัสดุหรือชิ้นทดสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทดสอบการดูดซึมน้ำ แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ตู้อบลมร้อน

3.2.10 เครื่องทดสอบการนำความร้อน

การทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา โดยการให้ความร้อนที่ผิวหน้า ด้านหนึ่งของชั้นทดสอบ ส่วนผิวหน้าอีกด้านรักษาอุณหภูมิไว้ที่อุณหภูมิห้องโดยการหล่อเย็นด้วยน้ำ เพื่อให้เกิดการนำความร้อนจากอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งโดยรอบผิวของชั้นทดสอบ มีการป้องกันการสูญเสียความร้อนด้วยฉนวนหุ้มอย่างดี ในขณะที่ทดสอบทำการวัดค่าอุณหภูมิ และค่าพลังงานความร้อน (heat) ที่มีหน่วยเป็น วัตต์ (W) จากกระแสและโวลต์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้า ค่าที่ได้ทั้งหมดจะนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ที่มีหน่วยเป็น $W/m.K$ โดยเครื่องทดสอบการนำความร้อนได้รับความอนุเคราะห์จาก ชีรวัฒน์ สินศิริ และคณะ แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบการนำความร้อน

3.3 การทดสอบสมบัติของวัสดุ

การทดสอบสมบัติของวัสดุ เป็นการทดสอบวัสดุขั้นพื้นฐาน เพื่อให้เข้าใจถึงสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุขั้นพื้นฐานที่ส่งผลต่อการผสมคอนกรีต

3.3.1 การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ

ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) เป็นสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบ ส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของน้ำ ที่มีปริมาตรเท่ากับวัสดุทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM C128 ดังสมการที่ 3.1 โดยทั่วไปค่าความถ่วงจำเพาะมีหลายค่า สำหรับงานวิจัยนี้ ใช้ค่าความถ่วงจำเพาะรวมที่ (bulk specific gravity) โดยคิดที่วัสดุอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (saturated surface dry; SSD)

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

เมื่อ

S_g = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุ

B = น้ำหนักของวัสดุอิ่มตัวผิวแห้งชั่งในอากาศ (g)

C = น้ำหนักของวัสดุอิ่มตัวชั่งในน้ำ (g)

3.3.2 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุ

การดูดซึมน้ำ (water absorption; WA) เป็นสมบัติของวัสดุที่สามารถดูดซึมน้ำไว้ การหาค่าการดูดซึมน้ำ เพื่อควบคุมปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตให้อยู่ในความชื้นเหลว ที่พอเหมาะกับการใช้งาน ซึ่งคำนวณได้จากผลต่างของความชื้นในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งกับสภาพที่แห้งตามมาตรฐาน ASTM C128 ดังสมการที่ 3.2

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

เมื่อ

W_a = การดูดซึมน้ำ (%)

B = น้ำหนักของวัสดุอิ่มตัวผิวแห้งชั่งในอากาศ (g)

A = น้ำหนักของวัสดุแห้งชั่งในอากาศ (g)

3.3.3 การทดสอบค่าความชื้นที่ผิวของวัสดุ

ความชื้นที่ผิว (surface moisture) เป็นสมบัติของวัสดุที่น้ำสามารถไหลเข้าหรือออกในช่องว่างเล็ก ๆ ของวัสดุได้ ซึ่งปริมาณน้ำหรือความชื้นในมวลรวมมีผลต่อปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีต ค่าความชื้นที่ผิวของวัสดุมวลรวมละเอียดอิมตัวผิวแห้ง (P_s) ตามมาตรฐาน ASTM C70 ดังสมการที่ 3.3

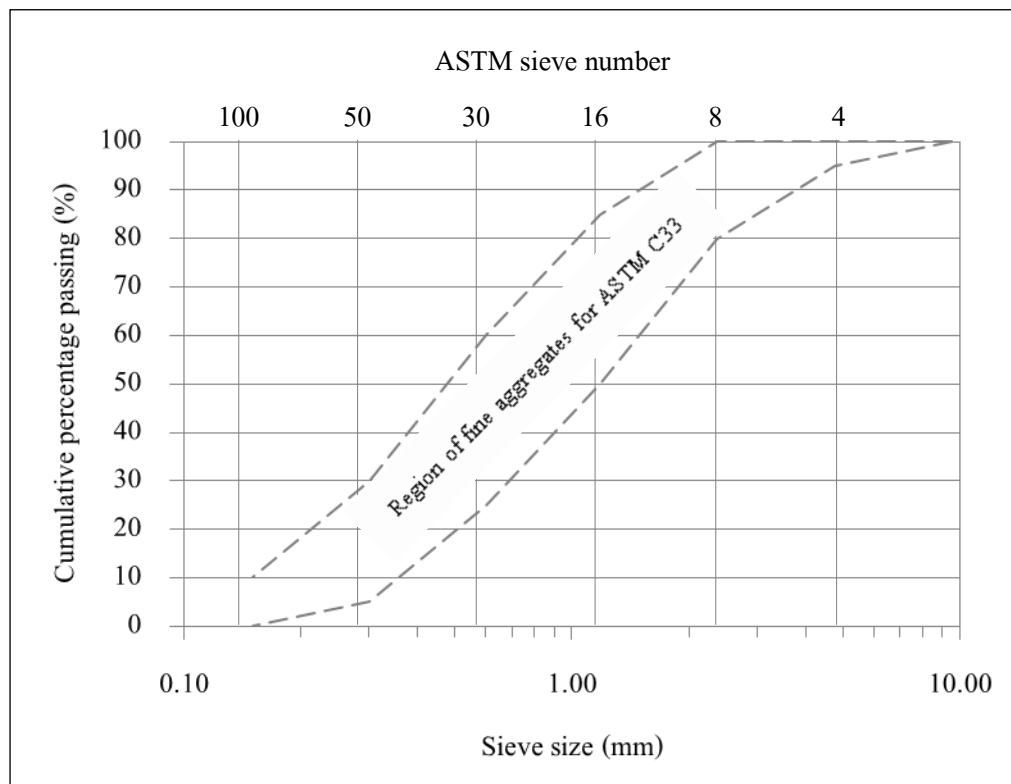
$$P_s = \left(\frac{W - V_d}{W_1 - W} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ

- P_s = ความชื้นที่ผิวของวัสดุทดสอบ อิมตัวผิวแห้ง (%)
- W = ปริมาณน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยวัสดุทดสอบ (g)
- V_d = น้ำหนักของวัสดุทดสอบหารด้วยความถ่วงจำเพาะอิมตัวผิวแห้ง (g)
- W_1 = น้ำหนักของวัสดุทดสอบ (g)

3.3.4 การวิเคราะห์ขนาดคละ

โดยทั่วไป มวลรวมที่ใช้ในการผสมคอนกรีตสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ซึ่งจำแนกตามขนาดด้วยตะแกรงเบอร์ 4 (ช่องเปิด 4.75 มม.) กล่าวคือ มวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่าช่องเปิดของตะแกรงเบอร์ 4 จัดเป็นมวลรวมหยาบ สำหรับมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของตะแกรงเบอร์ 4 จัดเป็นมวลรวมละเอียด การวิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวม ทำได้โดยการร่อนมวลรวมที่ได้จากการเก็บตัวอย่างในปริมาณที่ทราบค่า ผ่านตะแกรงมาตรฐานที่เรียงซ้อนกันตามขนาดของตะแกรง โดยให้ตะแกรงที่มีช่องเปิดใหญ่สุดอยู่ด้านบนและขนาดเล็กสุดอยู่ด้านล่าง สำหรับการวิเคราะห์ขนาดคละมวลรวมหยาบจะใช้ตะแกรง เบอร์ 3/8 3/4 1_{1/2} และ 3 นิ้ว เป็นต้น ขณะที่การวิเคราะห์ขนาดคละมวลรวมละเอียดจะใช้ตะแกรง เบอร์ 4 8 16 30 50 100 และ 200 ตามมาตรฐาน ASTM C33 ซึ่งผลการวิเคราะห์ขนาดคละมักแสดงเป็นร้อยละของน้ำหนักผ่านสะสม (cumulative percentage passing) แสดงดังรูปที่ 3.11 เมื่อคำนวณร้อยละของน้ำหนักค้างสะสม (cumulative percentage retained) บนตะแกรงมาตรฐานหารด้วยหนึ่งร้อย จะได้ค่าที่เรียกว่า โมดูลัสความละเอียด (fineness modulus)



รูปที่ 3.11 แผนภาพแสดงขนาดคละของมวลรวม

โมดูลัสความละเอียด เป็นตัวเลขที่บ่งบอกขนาดโดยประมาณของมวลรวม กล่าวคือ บอกลักษณะของทราย ว่าเป็นทรายหยาบ ละเอียด หรือละเอียดมาก โดยมวลรวมที่ละเอียดจะมีค่าโมดูลัสความละเอียดต่ำและมวลรวมหยาบจะมีค่าโมดูลัสความละเอียดสูง มาตรฐาน ASTM C33 ได้กำหนดขนาดคละรวมของมวลรวมละเอียด โดยมีค่าโมดูลัสความละเอียดระหว่าง 2.3-3.2 โดยค่าโมดูลัสความละเอียดนี้มีประโยชน์ในการนำไปออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ขนาดคละที่ดี จะช่วยให้สามารถลดปริมาณเพสต์ ทำให้ประหยัดและทำให้คอนกรีตเกาะตัวกันดีไม่แยกตัว (segregation)

3.4 การวิเคราะห์ระดับจุลภาค

การวิเคราะห์ระดับจุลภาคทำให้สามารถเข้าใจสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ ทั้งทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ควรศึกษา เนื่องจากสมบัติของวัสดุมีผลต่อการใช้งานของคอนกรีตหรือแม้แต่คอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

3.4.1 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค

เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (laser particle size analyzer) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ขนาดอนุภาคในระดับไมครอน โดยอาศัยหลักการกระเจิงและการเลี้ยวเบนของแสง โดยใช้ Helium-Neon laser เป็นแหล่งกำเนิดแสง กล่าวคือ เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านลำแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดแสงจะเกิดการเลี้ยวเบนของแสงขึ้นในมุมต่าง ๆ ตามลักษณะและขนาดของอนุภาคที่แสงเลเซอร์ตกกระทบ โดยมุมของการเลี้ยวเบนของแสงจะแปรผกผันกับขนาดของอนุภาค กล่าวคือ ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ มุมของการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์จะแคบ แต่ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็ก มุมของการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์จะกว้าง ซึ่งความเข้มแสงที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์ที่มุมต่าง ๆ จะถูกตรวจวัดและถูกคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์และค่าของขนาดอนุภาคนั้น ๆ รวมทั้งสามารถคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคได้โดยสามารถหาขนาดของอนุภาคได้ในช่วง 0.02-2000 ไมโครเมตรซึ่งมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง 5% และถ้าตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ทราบค่าความหนาแน่นจะสามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวของอนุภาคได้ โดยตัวอย่างที่ใช้วัดขนาดอนุภาคอยู่ในรูปผง (powder) และแห้ง เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแสดงดังรูป 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค

3.4.2 เครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์

เครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (x-ray fluorescence; XRF) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบ โดยอาศัยหลักการยิงรังสีเอกซ์ให้พุ่งเข้าชนกับตัวอย่าง ส่งผลให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมภายในวัตถุนั้นหลุดออกจากอะตอมในรูปของโฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในวงอิเล็กตรอนนั้น ซึ่งที่สถานะนี้อะตอมจะไม่เสถียร และอะตอมจะกลับสู่สถานะที่เสถียรขึ้น โดยการเปลี่ยนระดับพลังงานของ อิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทนที่ช่องว่างดังกล่าว ซึ่งในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน จะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานนั้นธาตุต่างชนิดในชิ้นงานจะมีความยาวคลื่น (พลังงาน) เฉพาะสำหรับธาตุนั้น ๆ จึงทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโฟตรอนที่เปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่าง ทำให้เราสามารถแยกได้ว่า ในตัวอย่างมีธาตุอะไรอยู่บ้าง

เครื่อง XRF ถึงแม้ว่าจะสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ในหลายรูปแบบ แต่ตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุด ก็คือ ตัวอย่างที่อยู่ในรูปของแข็ง และสามารถทนต่อสภาพความดันต่ำ (low pressure หรือ vacuum) ได้ ดังนั้นในกรณีตัวอย่างที่เป็นผง ต้องทำการอัดขึ้นรูปเป็นเม็ด โดยต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 20 มม. สำหรับตัวอย่างทรงกระบอกต้องมีขนาดไม่เกิน 15 ซม. หนาไม่เกิน 7.5 ซม. ในกรณีที่ตัวอย่างอยู่ในรูปของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบต้องขัดหรือทำให้เรียบในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของเหลว ควรทำให้ตัวอย่างมีความหนืดมากขึ้น โดยการระเหยน้ำที่เป็นส่วนผสมทิ้งไปก่อนการทดสอบ เครื่องทดสอบ XRF แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (XRF)

3.4.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

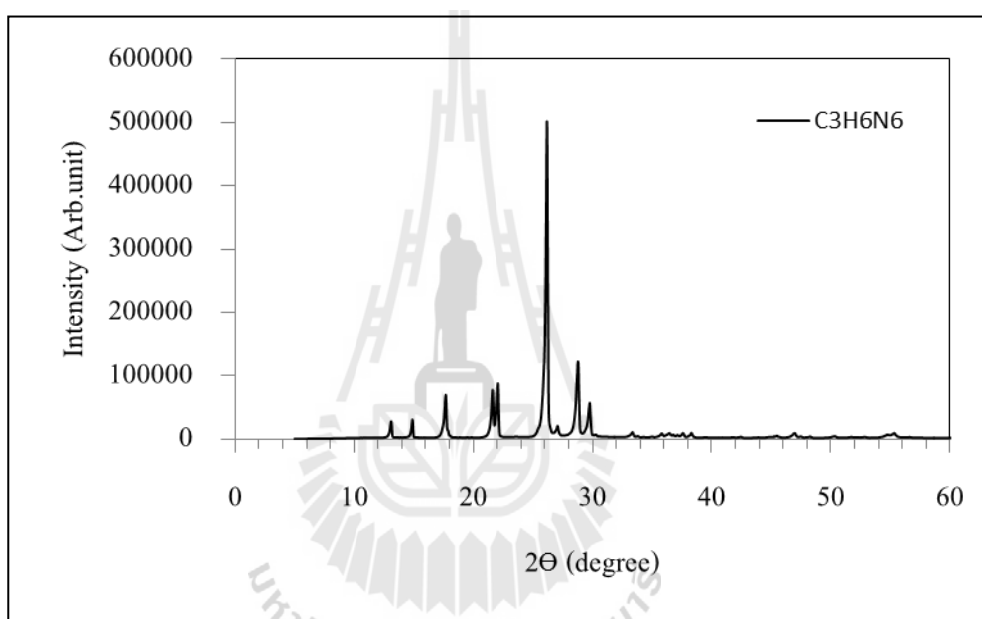
เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (x-ray diffraction; XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเป็นผลึกเพื่อหาสารประกอบของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของลำรังสีเอกซ์ กล่าวคือ เมื่อลำรังสีเอกซ์ตกกระทบวัตถุหรืออนุภาค จะเกิดการหักเหของลำรังสีที่สะท้อนทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกันและระยะห่างระหว่างระนาบอะตอม ที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปด้วย โดยที่ขนาดและประจุของอะตอมของสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว เปรียบได้กับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน ทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน เราจึงสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่าง ๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้น ๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้จากสมการของแบรกก์ (Bragg) ดังแสดงสมการที่ 3.4

$$n\lambda = 2d \cdot \sin\theta \quad (3.4)$$

เมื่อ

- n = ลำดับการเลี้ยวเบน (เลขจำนวนเต็มตั้งแต่ 1, 2, 3,...)
- λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (Å หรือ อังสตรอม)
- d = ระยะห่างระหว่างระนาบผลึกที่รังสีตกกระทบ
- θ = มุมตกกระทบ (องศา)

เครื่อง XRD สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็ง หรือตัวอย่างที่เป็นผง (powder) ได้ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบผิวจะต้องเรียบ ส่วนในกรณีตัวอย่างที่เป็นผง จะต้องมีความอนุภาคเล็กกว่า 325 mesh หรือ ประมาณ 40 ไมครอน (ผงละเอียดคล้ายผงแป้ง) จึงจะให้ผลการทดสอบที่ดี โดยปริมาณที่ใช้ในการทดสอบต่อครั้ง จะอยู่ประมาณ 1-2 กรัม ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นก้อน ต้องมีขนาดกว้างยาว ไม่เกิน 10 ซม. ทั้งนี้พื้นที่ทำการทดสอบเป็นเพียงบริเวณเล็ก ๆ ประมาณ 10 มม. เท่านั้น ตัวอย่างผลทดสอบ XRD ของผลึกเมลามีนบริสุทธิ์ แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกเมลามีนบริสุทธิ์

3.4.4 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (optical microscope; OM) เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการมองวัตถุที่มีขนาดเล็กในการศึกษาลักษณะโครงสร้างของวัตถุ ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวแสงที่ส่องผ่านเลนส์ กล้อง OM ใช้คลื่นแสงที่มนุษย์มองเห็น ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร ซึ่งแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นสั้น จะทำให้ภาพที่มีความคมชัดมากยิ่งขึ้น กล้องจุลทรรศน์แบบแสง แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM)

3.4.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค เนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (optical microscope หรือ OM) ที่มีความยาวคลื่นที่ยาวกว่า (กล้อง OM ใช้คลื่นแสงที่มนุษย์มองเห็น ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร) ทำให้กล้อง OM ไม่สามารถขยายวัตถุที่เล็กกว่า 0.2 ไมครอนได้ แต่ SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์ชนิดที่มีกำลังขยายสูง โดยใช้คุณสมบัติคลื่นของอิเล็กตรอนซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่าเป็นแหล่งกำเนิดแสง ทำให้ SEM มีความสามารถในการแยกแยะเชิงระยะได้มากถึง 0.2 นาโนเมตร ส่องกราดไปบนผิวหน้าของชิ้น

ทดสอบในการสร้างภาพในแนวระนาบและแนวลึก เครื่อง SEM สามารถให้ภาพของวัสดุที่มีกำลังขยายและความละเอียดสูง โดยมีกำลังขยายอยู่ในช่วง 10-500,000 เท่า โดยมีความละเอียดต่ำกว่า 1 นาโนเมตร เครื่อง SEM ได้ถูกใช้บ่อยครั้งในการสร้างภาพที่แสดงรูปร่างของวัตถุที่มีความละเอียดสูง นอกจากนี้เครื่อง SEM ได้ถูกใช้ในการบ่งชี้เฟสที่มีพื้นฐานมาจากการวิเคราะห์ทางเคมีเชิงคุณภาพ และ/หรือ โครงสร้างผลึก

ก่อนตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาจะถูกนำมาเข้าเครื่องถ่ายภาพขยายอนุภาคกำลังสูงหรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนหรือส่องกราด (scanning electron microscope หรือ SEM) เพื่อที่จะนำภาพถ่ายขยายของอนุภาค (scanning electron microscopy) มาวิเคราะห์ เตรียมตัวอย่าง โดยทำการทุบก้อนลูกบาศก์ขนาด $100 \times 100 \times 100$ mm ให้แตกเป็นชิ้นเล็ก ขนาดกว้าง \times ยาว ประมาณ 10×10 mm ความหนา 5 mm จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปทำให้แห้งด้วยเครื่อง Freeze-dryer ที่อุณหภูมิ -40°C ความดัน 0.5 Pascal เป็นเวลา 2 วัน หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปเคลือบผิวด้วยทองคำและนำไปทดสอบถ่ายภาพขยายอนุภาคกำลังสูงด้วยเครื่อง JSM-6460LA model Scanning Electron Microscope (JEOL) ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.5 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

3.5.1 การออกแบบส่วนผสม

งานวิจัยครั้งนี้ ทำการออกแบบส่วนผสม โดยการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนร้อยละ 15 25 และ 35 โดยน้ำหนัก อีกทั้งยังมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน (w/b) ทุกส่วนผสมเท่ากับ 0.5 และควบคุมความหนาแน่นสดเท่ากับ 1,000 1,100 1,200 และ 1,300 กก./ม.³ แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

รหัส ชิ้นทดสอบ	สัดส่วน (โดยน้ำหนัก)					ความ หนาแน่น
	ซีเมนต์	เถ้าลอย	ทราย	เมลามีน	น้ำ	
MF0D10	1	0	1	0	0.5	1,000
MFG15D10	1	0	0.85	0.15	0.5	1,000
MFG25D10	1	0	0.75	0.25	0.5	1,000
MFG35D10	1	0	0.65	0.35	0.5	1,000
MFP15D10	1	0	0.85	0.15	0.5	1,000
MFP25D10	1	0	0.75	0.25	0.5	1,000
MFP35D10	1	0	0.65	0.35	0.5	1,000
MF0D11	1	0	1	0	0.5	1,100
MFG25D11	1	0	0.75	0.25	0.5	1,100
MFG25FA10D11	0.9	0.1	0.75	0.25	0.5	1,100
MFP25D11	1	0	0.75	0.25	0.5	1,100
MFP25FA10D11	0.9	0.1	0.75	0.25	0.5	1,100
MF0D13	1	0	1	0	0.5	1,300
MFG15D13	1	0	0.85	0.15	0.5	1,300
MFG25D13	1	0	0.75	0.25	0.5	1,300
MFG25FA10D13	0.9	0.1	0.75	0.25	0.5	1,300
MFG35D13	1	0	0.65	0.35	0.5	1,300
MFP15D13	1	0	0.85	0.15	0.5	1,300
MFP25D13	1	0	0.75	0.25	0.5	1,300
MFP25FA10D13	0.9	0.1	0.75	0.25	0.5	1,300
MFP35D13	1	0	0.65	0.35	0.5	1,300
MFGP25FA5D12	0.95	0.05	0.75	0.25	0.5	1,200

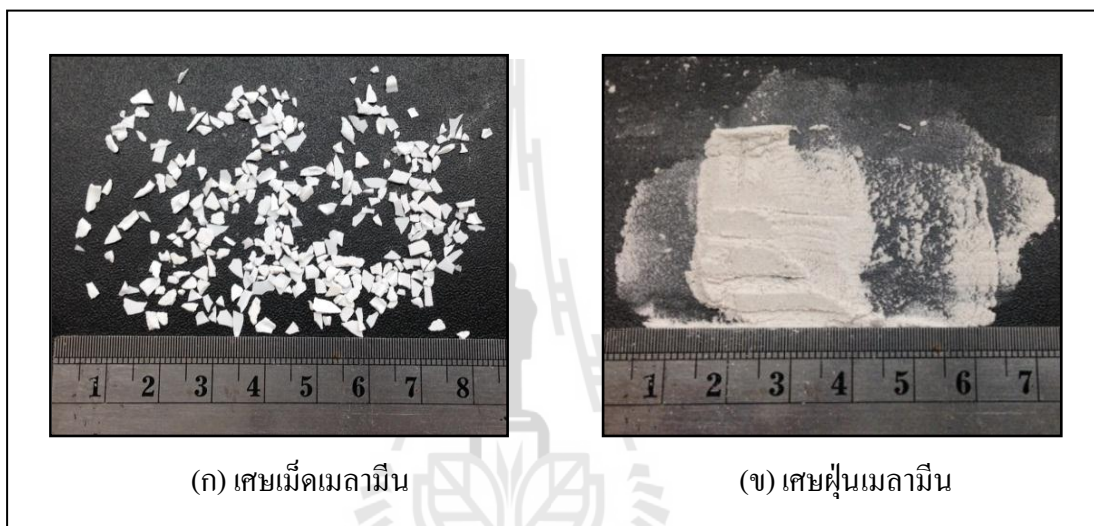
หมายเหตุ : MF0 = คอนกรีตมวลเบาปกติ, MFG = เศษเม็ดเมลามีน, MFP = เศษฝุ่นเมลามีน, FA = เถ้าลอย, D = ความหนาแน่น

3.5.2 การเตรียมเศษเมลามีน

เศษเมลามีนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้แบ่งเป็น 2 ประเภท

1) เศษเม็ดเมลามีนที่ได้จากกระบวนการบดข้อเศษครีบบเมลามีนจะถูกนำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 เพื่อคัดขนาด แสดงดังรูปที่ 3.17 (ก)

2) เศษฝุ่นเมลามีนที่ได้จากกระบวนการขจัดตกแต่งขอบของผลิตภัณฑ์จะถูกนำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 140 เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่ติดมากับเศษฝุ่นเมลามีน แสดงดังรูปที่ 3.17 (ข)



รูปที่ 3.17 เศษเม็ดเมลามีนและเศษฝุ่นเมลามีน

3.5.3 การเตรียมโฟม

โฟมที่ใช้สำหรับผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์สามารถทำได้โดย นำสารก่อโฟมมาเจือจางกับน้ำในอัตราส่วน สารก่อโฟมต่อน้ำ 1 : 40 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำให้เป็นฟองโฟมด้วยเครื่องสร้างโฟมที่ต่อเข้ากับเครื่องอัดอากาศที่ความดัน 5.0 บาร์ เพื่อให้ได้โฟมที่มีฟองอากาศขนาดเล็กตั้งแต่ 0.1-1.0 มม. ซึ่งความหนาแน่นของโฟมประมาณ 50 กก./ม.³ เทคนิคในการทำให้น้ำกลายเป็นโฟมเหลว (liquid foam) ก่อนที่จะนำไปผสมกับคอนกรีตสดเรียกว่า pre-formed foam method ตามมาตรฐาน ASTM C796 แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การผสมโฟมในคอนกรีตมวลเบาแบบ pre-formed foam method

3.5.4 การหล่อขึ้นทดสอบ

การหล่อขึ้นทดสอบคอนกรีตลงในแบบหล่อชนิดต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.2.7 สามารถทำได้โดย ก่อนการหล่อคอนกรีตจะใช้น้ำมันทาบาง ๆ ที่ด้านในของแบบหล่อเพื่อให้สามารถถอดแบบได้ง่ายขึ้น แต่ต้องพึงระวังการทาน้ำมันต้องไม่มากเกินไป เพราะจะทำให้คอนกรีตผสมกับน้ำมันส่วนเกิน ทำให้มีปัญหาเรื่องการแข็งตัวและลดกำลังของคอนกรีตได้ จากนั้นเทคอนกรีตลงในแบบหล่อทันทีภายหลังผสมคอนกรีตเสร็จ โดยแบ่งเป็นจำนวน 2 ชั้น แต่ละชั้นกระทุ้งด้วยแท่งพลาสติกอย่างน้อย 35 ครั้ง แท่งพลาสติกหน้าตัดหกเหลี่ยมขนาด 0.7 ซม. ยาว 30 ซม. การกระทุ้งเพื่อลดช่องว่างภายในขึ้นทดสอบคอนกรีต แต่ต้องไม่มากจนทำให้คอนกรีตเกิดการแยกตัว ภายหลังจากกระทุ้งเรียบร้อยแล้วให้ทำการเทคอนกรีตให้พูนปากแบบหล่อเล็กน้อย จากนั้นทิ้งคอนกรีตไว้ 1 ชั่วโมง จึงปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ แสดงดังรูปที่ 3.19

3.5.5 การถอดแบบและการบ่ม

ภายหลังจากเทคอนกรีต 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อออก แล้วนำขึ้นทดสอบไปทำการบ่มโดยการป้องกันการสูญเสียน้ำ ด้วยวิธีหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกโพลีเอทีลีน (polyethylene) โดยแผ่นพลาสติกจะต้องแนบกับผิวของคอนกรีต รอยต่อระหว่างแผ่นจะต้องสนิทและมีระยะเหลื่อมมากพอเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำออกจากคอนกรีต จากนั้นขึ้นทดสอบที่หุ้มด้วยแผ่นพลาสติกจะถูกเก็บไว้ในถุงพลาสติกที่ปิดปากถุงอีกหนึ่งชั้น และนำไปบ่มไว้ในห้องที่มีอุณหภูมิประมาณอุณหภูมิ 23.0 ± 2.0 °C จนกว่าจะถึงวันทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM C495



รูปที่ 3.19 การหล่อขึ้นทดสอบ

3.6 การทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

3.6.1 การทดสอบความหนาแน่นแห้ง

การทดสอบความหนาแน่นแห้ง (dry density test) ของชิ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม. ที่มีอายุบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วัน โดยคำนวณได้จากน้ำหนักหารด้วยปริมาตรของชิ้นทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM C567 แสดงดังตารางที่ 3.5

$$D_d = \frac{W}{V} \quad (3.5)$$

เมื่อ

D_d = ความหนาแน่นแห้ง (กก./ม.³)

W = มวลของชิ้นทดสอบ (กก.)

V = ปริมาตร (ม.³)

3.6.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength test) ของชิ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม. ที่มีอายุบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วัน โดยใช้หน้าที่เรียบของชิ้นทดสอบสองด้านตรงกันข้ามเป็นด้านรับแรง (ผิวหน้าด้านที่ปาดให้เรียบจะตั้งฉากกับแกนของแรงกด) การให้น้ำหนักกระทำแก่คอนกรีตใช้อัตราคงที่ที่ทำให้เกิดความเค้นเท่ากับ 0.40 เมกะพาสคัล/วินาที (ประมาณ 100 kgf/s) จนกระทั่งคอนกรีตวิบัติและไม่สามารถรับแรงที่สูงขึ้นได้ต่อไปอีก ตามมาตรฐาน ASTM C109 ค่ากำลังรับแรงอัด (C_s) แสดงดังสมการที่ 3.6

$$C_s = \frac{P_u}{A} \quad (3.6)$$

เมื่อ

C_s = กำลังรับแรงอัด (กก./ม.²)

P_u = น้ำหนักกดสูงสุดของชิ้นทดสอบ (กก.)

A = พื้นที่หน้าตัดที่รับน้ำหนักกดของชิ้นทดสอบ (ม.²)

3.6.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

การทดสอบการดูดซึมน้ำ (water absorption) ของคอนกรีตมวลเบาสามารถทำได้ โดยการแช่ชิ้นทดสอบขนาด $100 \times 100 \times 100$ มม. ที่อายุบ่ม 28 วัน ในน้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดให้เอาชิ้นจากน้ำแล้วใช้ผ้าซับน้ำส่วนเกินที่ผิวของชิ้นทดสอบและชั่งน้ำหนักภายในเวลา 30 วินาที ซึ่งค่าที่ได้คือน้ำหนักเปียก (wet weight) โดยการบันทึกค่าน้ำหนักให้ละเอียดถึง 0.05 กก. จากนั้นทำการอบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบ ค่าที่ได้คือน้ำหนักอบแห้ง (dry weight) ของชิ้นทดสอบ ซึ่งค่าการดูดซึมน้ำสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.4 โดยทำการทดสอบ 3 ชิ้นทดสอบเป็นอย่างน้อย รายละเอียดวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1403 แสดงดังสมการที่ 3.7

$$W_a = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \quad (3.7)$$

เมื่อ

- W_a = การดูดซึมน้ำ (%)
- W_w = น้ำหนักของชิ้นทดสอบเมื่อเปียก (กก.)
- W_d = น้ำหนักของชิ้นทดสอบเมื่อแห้ง (กก.)

3.6.4 การทดสอบการนำความร้อน

การนำความร้อน (conduction) เกิดจากการเคลื่อนที่ของพลังงานระหว่างโมเลกุลที่อยู่ติดกัน กล่าวคือ การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนผ่าน โดยตรงจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งโดยการสัมผัสกัน การถ่ายเทความร้อนจะเกิดบริเวณที่ร้อนกว่าหรือมีการเคลื่อนไหวของโมเลกุลมากกว่าไปสู่บริเวณที่เย็นกว่า วัสดุจะมีการนำความร้อนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุล วัสดุที่มีความหนาแน่นมากจะนำความร้อนได้มาก

วัสดุที่จะนำความร้อนได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity ใช้สัญลักษณ์ k) โดยวัดค่าในรูปของอัตราปริมาณความร้อนไหลต่อหน่วยเวลาจากจุดระยะทางหนึ่งถึงอีกจุดหนึ่งที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดที่ไหลผ่าน และหน่วยวัดอุณหภูมิวัดเป็น W/m.K หรือ $\text{W/m.}^\circ\text{C}$

ชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 69 มม. สูง 75 มม. อายุบ่ม 28 วัน พื้นที่ผิวหน้าสัมผัสของชิ้นทดสอบ (A) เรียบทั้งสองด้าน การทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาสามารถหาได้จาก เครื่องทดสอบการนำความร้อนที่ให้ปริมาณความร้อนไหลผ่านชิ้นทดสอบ (Q) ด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดความร้อนบนผิวสัมผัสด้านหนึ่งของแท่งทองแดงซึ่งอยู่ติดกับชิ้นทดสอบ จนทำให้แท่งทองแดงมีอุณหภูมิประมาณ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ และผิวสัมผัสของชิ้นทดสอบอีกด้านที่อยู่ตรงกันข้ามจะสัมผัสอยู่กับแท่งทองแดงที่ควบคุมให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องโดยการหล่อเย็นด้วยน้ำหมุนวนเพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อน ทำการวัดค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ของชิ้นทดสอบสองจุดที่มีระยะห่าง (L) เท่ากับ 55 มม. นำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ 3.5 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน การทดสอบการนำความร้อนตามมาตรฐาน ASTM E1225 แสดงดังสมการที่ 3.8

$$k = \frac{QL}{A\Delta T} \quad (3.8)$$

เมื่อ

k = Thermal conductivity (W/m.K หรือ W/m. $^{\circ}\text{C}$)

Q = ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านตัวอย่างทดสอบ (Watt หรือ W)

L = ความหนาของตัวอย่างทดสอบ (m)

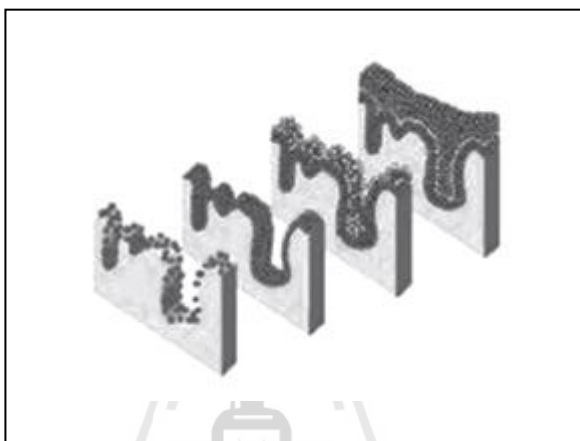
A = พื้นที่หน้าตัดขวาง (m^2)

ΔT = ผลต่างระหว่างจุดที่วัดอุณหภูมิ (K หรือ $^{\circ}\text{C}$)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.6.5 การทดสอบความพรุน

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบความพรุนด้วยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller) โดยอาศัยหลักการดูดซับ (adsorption) ของก๊าซไนโตรเจนที่สามารถแทรกเข้าถึง ทั้งบนผิวและภายในรูพรุนของวัสดุ โดยก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับจะเคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะโมเลกุลชั้นเดียว จนเต็มก่อน จากนั้นก๊าซไนโตรเจนจะแพร่กระจายในลักษณะโมเลกุลชั้นจนเต็มรูพรุนของวัสดุ แสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 การดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนผิวและภายในรูพรุนของวัสดุ

วัสดุทดสอบจะถูกให้ความร้อนเพื่อให้ความชื้นและทำให้เป็นสุญญากาศเพื่อให้เซลล์ไม่มีโมเลกุลของก๊าซอื่น หลังจากนั้นเซลล์จะถูกจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวเพื่อทำการทดสอบอยู่ในอุณหภูมิต่ำ แล้วส่งผ่านก๊าซไนโตรเจนเพื่อให้วัสดุดูดซับจนมีความดันลดลง (P) เทียบกับความดันก๊าซไนโตรเจนคงที่ (P_0) ซึ่งจะได้ค่าความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) และปริมาณของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ (V) หลังจากนั้นก๊าซไนโตรเจนจะถูกปล่อยเข้ามาอีกครั้งจนความดันสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับหนึ่งโดยประมาณ ($P/P_0 \cong 1$) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ถูกดูดซับกับความดันสัมพัทธ์ของก๊าซไนโตรเจน แสดงดังสมการที่ 3.9

$$\frac{1}{V \left[\left(\frac{P_0}{P} \right) - 1 \right]} = \frac{1}{V_m C} - \frac{C-1}{V_m C} \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (3.9)$$

- เมื่อ
- V = ปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ (g)
 - V_m = ปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวในลักษณะโมเลกุลชั้นเดียว (g)
 - P_0 = ความดันอิ่มตัวก๊าซไนโตรเจน (mmHg)
 - P = ความดันก๊าซไนโตรเจนที่ใช้ในการทดลอง (mmHg)
 - C = ค่าคงที่ของพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ

จะได้พื้นที่ผิวสัมผัส (S) ดังสมการที่ 3.10

$$S_t = \frac{VNA_{cs}}{M}$$

$$S = \frac{S_t}{W} \quad (3.10)$$

- เมื่อ
- S_t = พื้นที่ผิวของวัสดุ (m^2)
 - N = เลขอาโวกราโดร (mol^{-1})
 - A_{cs} = พื้นที่หน้าตัดโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจน ($16.2 \cdot 10^{-23} m^2$)
 - M = น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจน (28 g/mol)
 - W = น้ำหนักของวัสดุ (g)
 - S = พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ (m^2/g)

จะได้ปริมาตรรูพรุนรวม (V_p) และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (ϕ_p) ดังสมการที่ 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ

$$V_p = \frac{W_s}{\rho} \quad (3.11)$$

$$\phi_p = \frac{2V_p}{S_t} \quad (3.12)$$

เมื่อ

V_p = ปริมาตรรูพรุนรวมของวัสดุ (m^3)

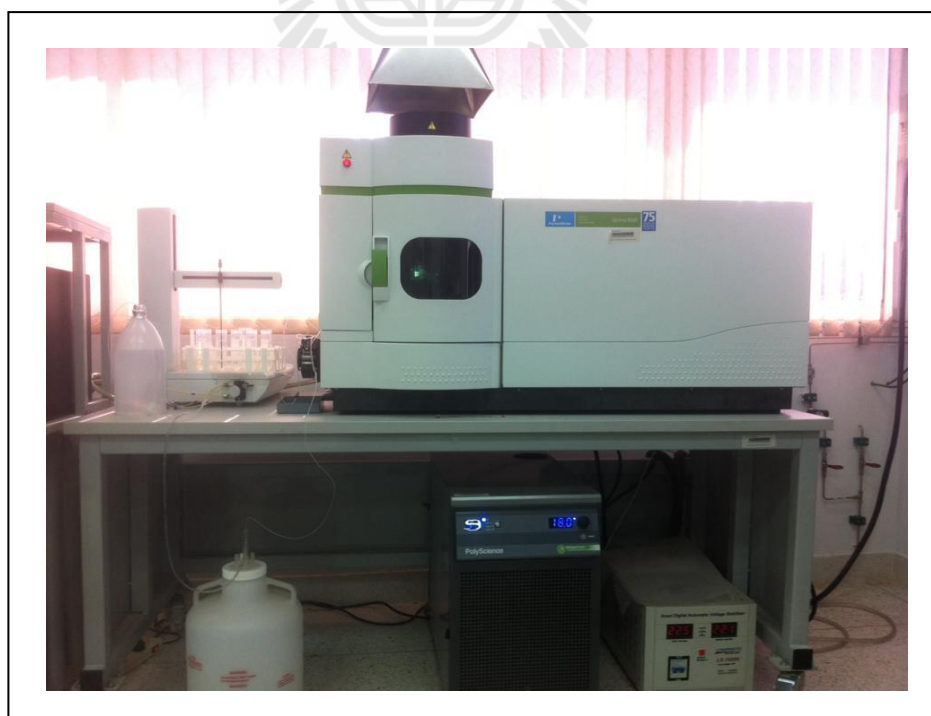
W_s = ปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิว (g)

ρ = ความหนาแน่นของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิว (g/m^3)

ϕ_p = ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของวัสดุ (m)

3.6.6 การทดสอบการชะละลาย

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว โดยขึ้นทดสอบที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 จากนั้นผงขึ้นทดสอบจะถูกนำมาแช่ด้วยสารละลายกรดแอสติกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ที่มีค่า pH เท่ากับ 2.88 ที่อัตราส่วนระหว่างผงขึ้นทดสอบและสารละลายเท่ากับ 1:20 และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่อัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง แล้วกรองสารละลายที่ได้ด้วยกระดาษกรอง (filter papers) เบอร์ 42 ขนาดรูพรุน 2.5 ไมครอน และนำสารละลายตัวอย่างที่ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก ด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก (inductively coupled plasma spectroscope; ICP) แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก ICP

3.7 การวิเคราะห์การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2³ แฟกทอเรียล

การศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2³ แฟกทอเรียล โดยมี 3 ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ และมีการเพิ่มจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัย

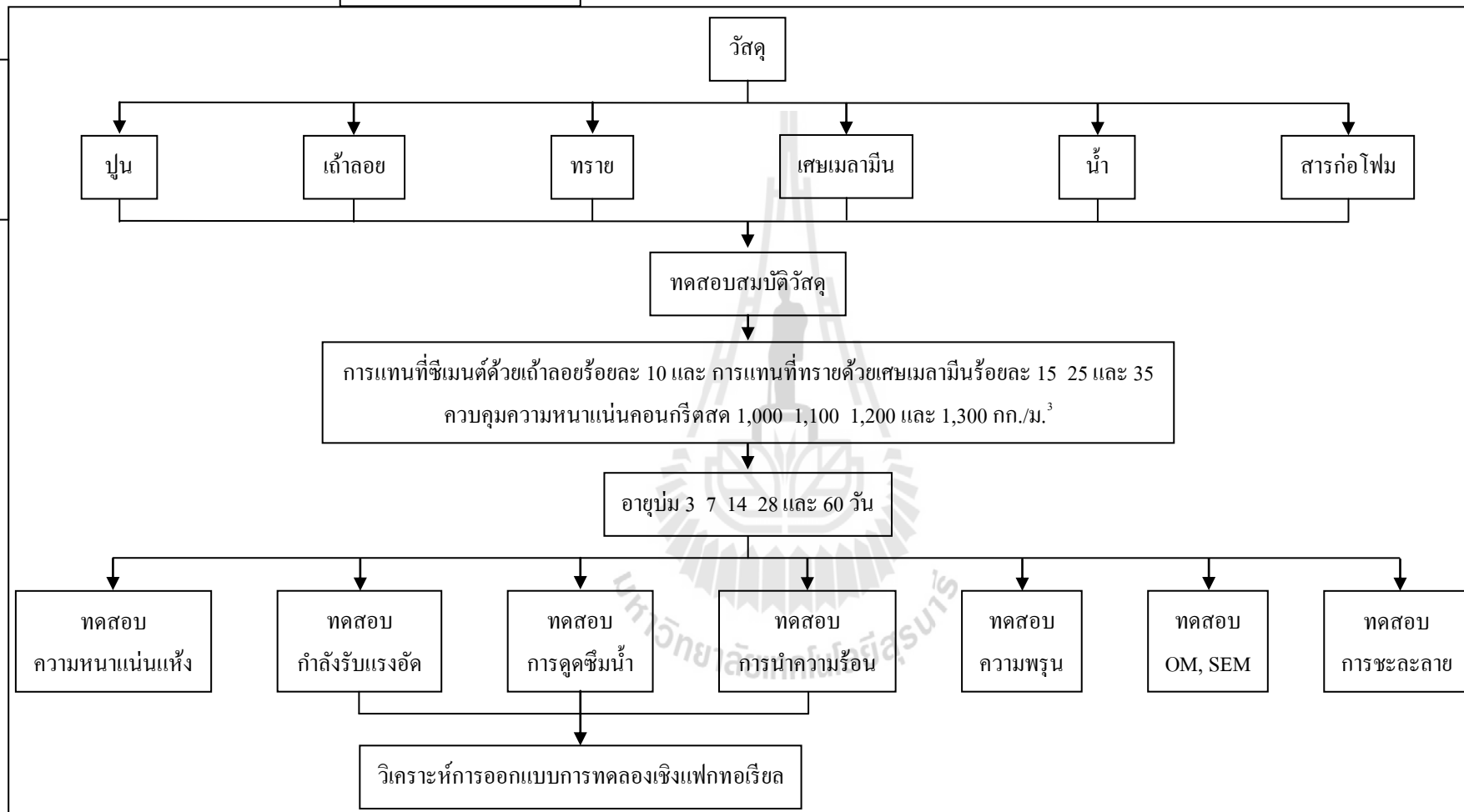
ปัจจัย (Factor)	รหัส	ระดับของปัจจัย (Level)
เศษเมลามีน (A)	-1	แทนที่ทรายด้วยเศษเม็ดเมลามีนร้อยละ 25
	0	แทนที่ทรายด้วยเศษเม็ดและเศษฝุ่นเมลามีนร้อยละ 25 (50% : 50%)
	+1	แทนที่ทรายด้วยเศษฝุ่นเมลามีนร้อยละ 25
เถ้าลอย (B)	-1	ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย
	0	แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 5
	+1	แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10
ความหนาแน่น (C)	-1	ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาเท่ากับ 1,100 กก./ม. ³
	0	ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาเท่ากับ 1,200 กก./ม. ³
	+1	ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาเท่ากับ 1,300 กก./ม. ³

ผลการทดสอบที่ได้ จะนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance; ANOVA) ของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2³ แฟกทอเรียลในการทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อน เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ($\alpha=0.05$)

3.8 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย

แผนภาพการดำเนินงานวิจัยโดยสรุป แสดงดังรูปที่ 3.22





รูปที่ 3.22 แผนการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากวิธีการดำเนินงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนต่าง ๆ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ ในการรีไซเคิลเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์โดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายบางส่วนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ อีกทั้งยังมีการนำเถ้าลอยมาใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ซึ่งผลลัพธ์จากการดำเนินงานวิจัยสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

- 4.1 สมบัติของวัสดุยึดประสานและมวลรวมละเอียด
- 4.2 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
- 4.3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
- 4.4 ผลวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล
- 4.5 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
- 4.6 ผลวิเคราะห์การดูดซึมน้ำของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล
- 4.7 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
- 4.8 ผลวิเคราะห์การนำความร้อนของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล
- 4.9 การกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง
- 4.10 การวิเคราะห์ความพรุนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
- 4.11 การวิเคราะห์ภาพถ่าย SEM ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
- 4.12 การวิเคราะห์ภาพถ่ายจุลทรรศน์ออปติคอลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
- 4.13 การชะละลายสารปนเปื้อน โลหะหนักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

4.1 สมบัติของวัสดุยึดประสานและมวลรวมละเอียด

สมบัติของวัสดุทั้งทางกายภาพและทางเคมี เป็นสิ่งสำคัญที่ควรศึกษา เนื่องจากสมบัติของวัสดุมีผลต่อการใช้งานของคอนกรีตหรือแม้แต่คอนกรีตมวลเบา สมบัติที่สำคัญได้แก่ รูปร่าง สี ความละเอียด ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ และองค์ประกอบทางเคมี เป็นต้น การทำความเข้าใจสมบัติของวัสดุนั้น ๆ จะนำไปสู่การใช้งานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

4.1.1 สมบัติทางกายภาพ

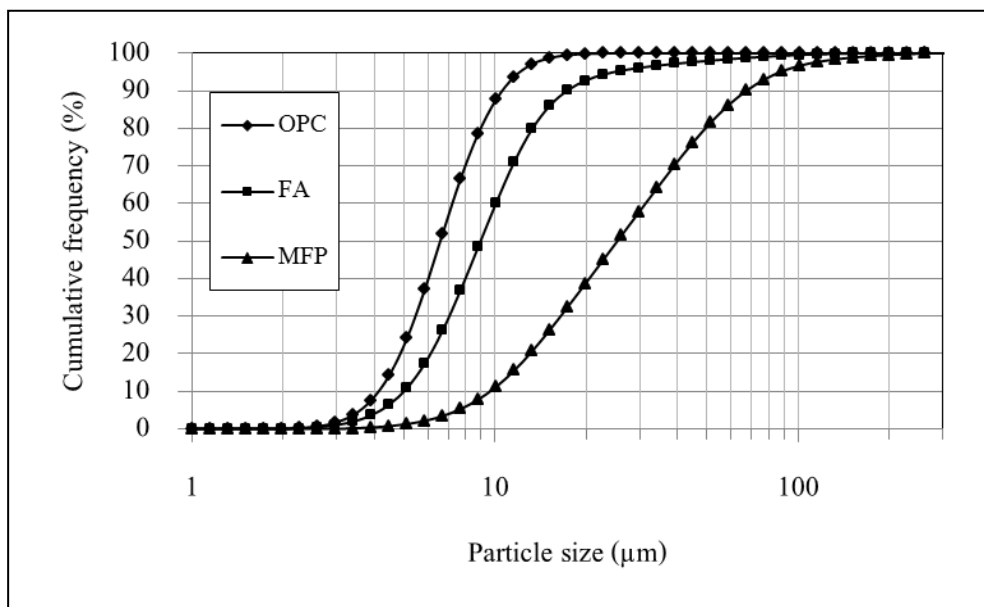
ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของวัสดุยึดประสาน (ปูนซีเมนต์และถั่วลอ) แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะรูปร่างเป็นผงสีเทา ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 7.05 ไมโครเมตร และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 (อ้างอิงจากผู้ผลิต) ขณะที่ถั่วลอมีลักษณะรูปร่างเป็นผงสีน้ำตาลเทา ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 8.82 ไมโครเมตร และค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.02 ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์และถั่วลอมีขนาดใกล้เคียงกัน แต่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าถั่วลอ สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของมวลรวมละเอียด (ทราย เศษเม็ดเมลามีนและเศษฝุ่นเมลามีน) พบว่า ทรายมีลักษณะรูปร่างเป็นก้อนมนสีน้ำตาล โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.97 ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.52 และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.33 ขณะที่เศษเม็ดเมลามีนมีลักษณะรูปร่างเป็นก้อนแบนสีขาว โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.98 ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.50 และ ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 5.51 อีกทั้งเศษฝุ่นเมลามีนมีลักษณะรูปร่างเป็นผงฝุ่นสีขาว มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 34.01 ไมโครเมตร และค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.50 ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าเศษเมลามีน (ทั้งเม็ดและฝุ่น) มีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าทรายมาก แต่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าทราย

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุยึดประสานและมวลรวมละเอียด

วัสดุ	รูปร่าง/สี	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย/ โมดูลัสความละเอียด**	ความ ถ่วงจำเพาะ	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
ปูนซีเมนต์	เหลี่ยมมุม/สีเทา	7.05 ไมครอน	3.15*	n/a
ถั่วลอ	กลมมน/สีน้ำตาล	8.82 ไมครอน	2.02	n/a
ทราย	ก้อนมน/สีน้ำตาล	1.97**	2.52	0.33
เศษเม็ดเมลามีน	ก้อนแบน/สีขาว	3.98**	1.50	5.51
เศษฝุ่นเมลามีน	ผงฝุ่น/สีขาว	34.01 ไมครอน	1.50	n/a

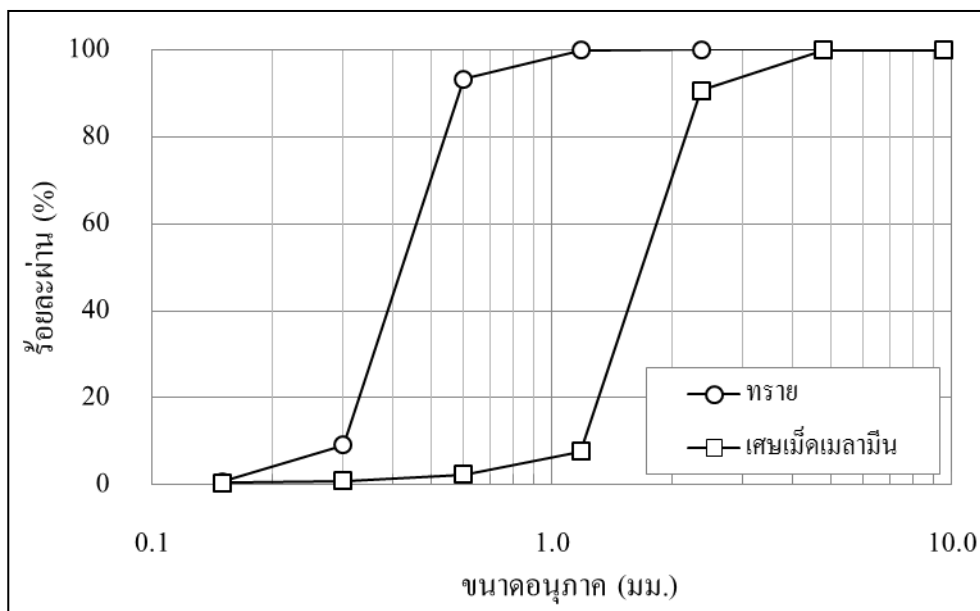
หมายเหตุ : *ข้อมูลอ้างอิงจากผู้ผลิต, **โมดูลัสความละเอียด เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความละเอียดของมวลรวม

ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยที่ใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่า ปูนซีเมนต์มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 2.27-22.78 ไมโครเมตร โดยที่เถ้าลอยมีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 2.60-152.45 ไมโครเมตร ซึ่งการกระจายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์กับเถ้าลอยมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน สำหรับการกระจายขนาดอนุภาคของเศษฝุ่นเมลามีนที่ใช้ในการแทนที่ทรายบางส่วน พบว่า เศษฝุ่นเมลามีนมีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 3.14-262.38 ไมโครเมตร ซึ่งถือว่าเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดอนุภาคของทราย



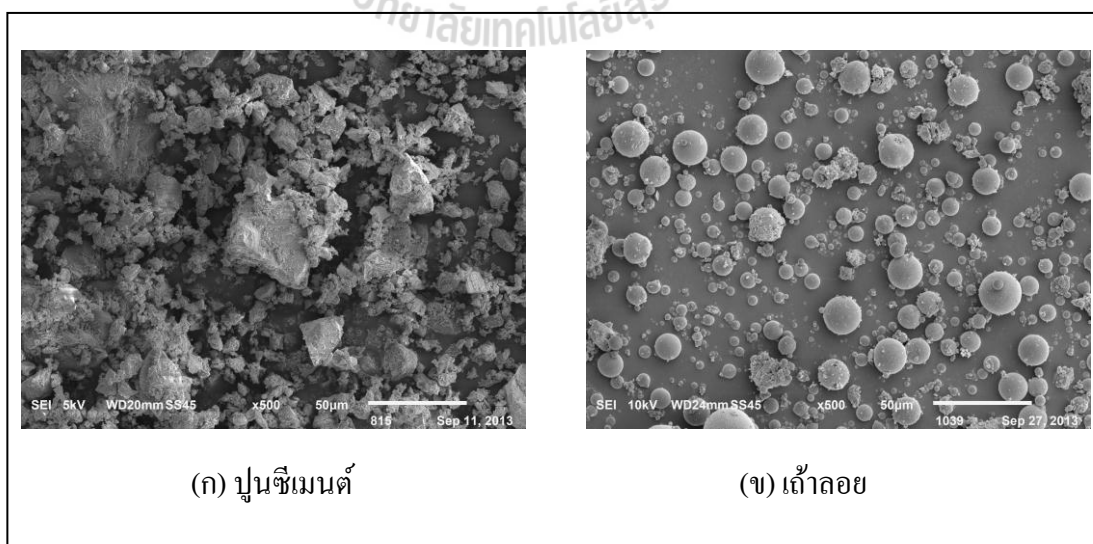
รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ เถ้าลอยและเศษฝุ่นเมลามีน

ผลการวิเคราะห์โมดูลัสความละเอียดของทรายและเศษเม็ดเมลามีน แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า โมดูลัสความละเอียดของทรายมีค่าเท่ากับ 1.97 โดยทรายส่วนใหญ่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 50 (ขนาดอนุภาคประมาณ 0.3 มิลลิเมตร) ขณะที่โมดูลัสความละเอียดของเศษเม็ดเมลามีนมีค่าเท่ากับ 3.98 โดยเศษเม็ดเมลามีนส่วนใหญ่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 16 (ขนาดอนุภาคประมาณ 1.18 มิลลิเมตร) ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าเศษเม็ดเมลามีนมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าทราย



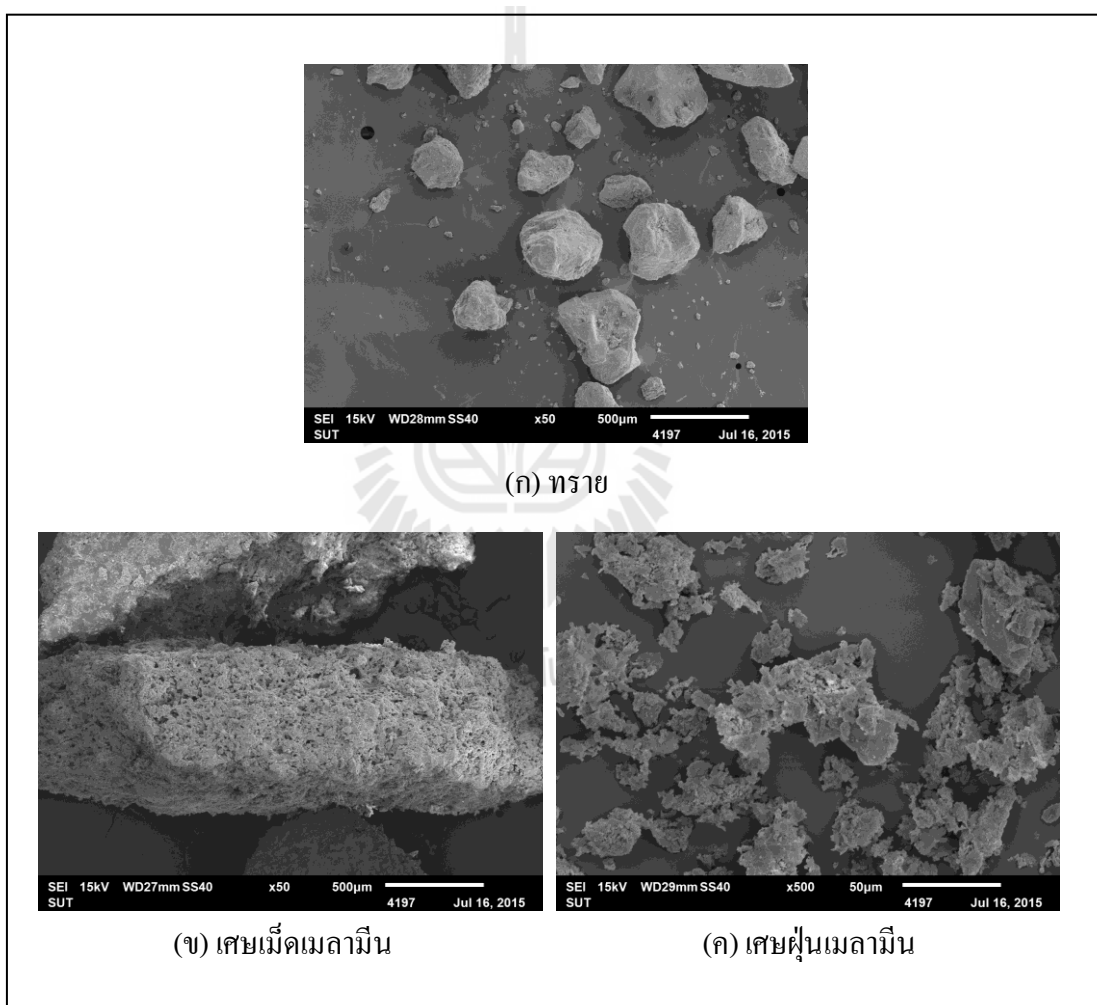
รูปที่ 4.2 แสดงขนาดส่วนคละของทรายและเศษเม็ดเมลามีน

จากภาพถ่ายของวัสดุยึดประสาน (ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ ขณะที่เถ้าลอยมีลักษณะรูปร่างทรงกลมมน (rounded) และผิวเรียบ (smooth) แสดงดังรูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยด้วยกล้อง SEM

จากภาพถ่ายของวัสดุรวมละเอียด (ทราย เศษเม็ดเมลามีน และเศษฝุ่นเมลามีน) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ทรายมีลักษณะรูปร่างเป็นก้อนมน ผิวขรุขระเล็กน้อย ขณะที่เศษเม็ดเมลามีนมีลักษณะรูปร่างก้อนแบบ (flaky) ผิวกึ่งเรียบกึ่งขรุขระ กล่าวคือ บริเวณรอยแตกที่เกิดจากการบดย่อยเศษเม็ดเมลามีนจะมีผิวขรุขระ ขณะที่พื้นผิวปกติของเศษเม็ดเมลามีนจะมีผิวเรียบ สำหรับเศษฝุ่นเมลามีนมีลักษณะรูปร่างเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ พื้นผิวที่ผิวสัมผัสมากเนื่องจากมีขนาดอนุภาคที่เล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับทรายและเศษเม็ดเมลามีน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายของทราย เศษเม็ดและเศษฝุ่นเมลามีนด้วยกล้อง SEM

4.1.2 องค์ประกอบทางเคมี

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยึดประสาน (ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย) โดยเครื่องทดสอบ XRF แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีองค์ประกอบออกไซด์หลัก (major oxides) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกา (SiO₂), เฟอริกออกไซด์ (Fe₂O₃), และอะลูมิเนียมออกไซด์หรืออลูมินา (Al₂O₃) ร้อยละโดยน้ำหนักเท่ากับ 66.33 18.60 4.03 และ 3.77 ตามลำดับ ซึ่งออกไซด์ทั้ง 4 นี้รวมกันได้ร้อยละ 92.73 ของปูนซีเมนต์ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รอง (minor oxides) ได้แก่ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃), แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), และออกไซด์ของอัลคาไล (Na₂O และ K₂O) และมีส่วนประกอบของออกไซด์อื่นผสมอยู่บ้าง เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO₂) เป็นต้น ซึ่งออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันและรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่สำคัญอยู่ 4 ชนิดคือ

- 1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (tricalcium silicate) องค์ประกอบทางเคมีคือ 3CaO.SiO₂ หรือเขียนเป็น C₃S
- 2) ไดแคลเซียมซิลิเกต (dicalcium silicate) องค์ประกอบทางเคมีคือ 2CaO.SiO₂ หรือเขียนเป็น C₂S
- 3) ไตรแคลเซียมอลูมินา (tricalcium aluminate) องค์ประกอบทางเคมี 3CaO.Al₂O₃ หรือเขียนเป็น C₃A
- 4) เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์ (tetracalcium aluminoferrite) องค์ประกอบทางเคมีคือ 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ หรือเขียนเป็น C₄AF

สำหรับเถ้าลอยมีองค์ประกอบออกไซด์หลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกา (SiO₂), เฟอริกออกไซด์ (Fe₂O₃), และอลูมินา (Al₂O₃) ร้อยละโดยน้ำหนักเท่ากับ 13.56 36.16 10.90 และ 18.83 ตามลำดับ ซึ่งออกไซด์ทั้ง 4 นี้รวมกันได้ร้อยละ 79.45 ของเถ้าลอย ซึ่งตรงกับเถ้าลอยชนิด C ที่มีปริมาณของ SiO₂ + Fe₂O₃ + Al₂O₃ รวมกันได้ร้อยละ 65.89 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 50 และสมบัติอื่น ๆ ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C618

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย

องค์ประกอบเคมี	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ร้อยละ โดยมวล)	เถ้าลอย (ร้อยละ โดยมวล)
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	66.33	13.56
ซิลิกา (SiO ₂)	18.60	36.16
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	4.03	10.90
อลูมินา (Al ₂ O ₃)	3.77	18.83
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	2.67	3.32
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	2.13	7.85
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	1.39	7.34
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.46	1.93
สารประกอบอื่น ๆ	1.00	
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (loss on ignition หรือ LOI)	n/a	n/a
CaO + SiO ₂ + Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	92.73	-
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ + CaO + MgO	-	87.30

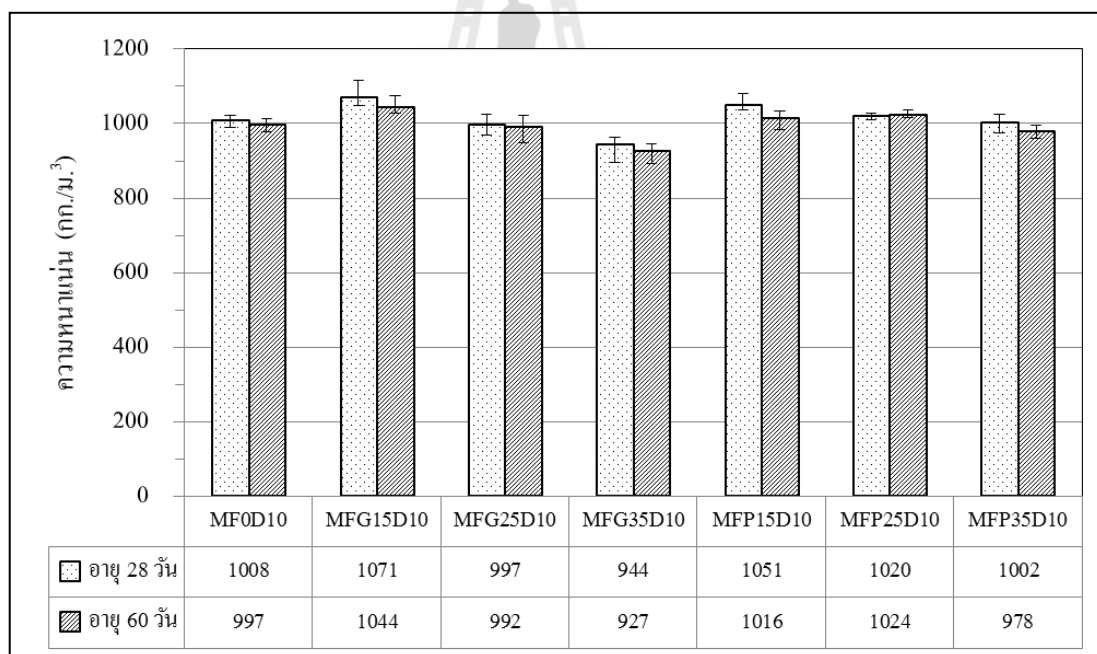
4.2 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

ความหนาแน่นเป็นหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลสมบัติทางกายภาพจำนวนมากในคอนกรีตมวลเบา ตารางที่ 4.3 แสดงความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสอายุ 28 และ 60 วัน จากการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสด 1,000 1,100 และ 1,300 กก./ม.³ พบว่า คอนกรีตมวลเบาปกติ (MF0) อายุ 28 วัน มีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1,008 1,105 และ 1,302 กก./ม.³ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นของคอนกรีตสด หลังจากที่คอนกรีตมวลเบาปกติมีอายุได้ 60 วัน พบว่าความหนาแน่นแห้งมีค่าลดลงเล็กน้อยเป็น 997 1,062 และ 1,281 กก./ม.³ ตามลำดับ เนื่องจากการระเหยของน้ำตามธรรมชาติของคอนกรีต

ตารางที่ 4.3 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

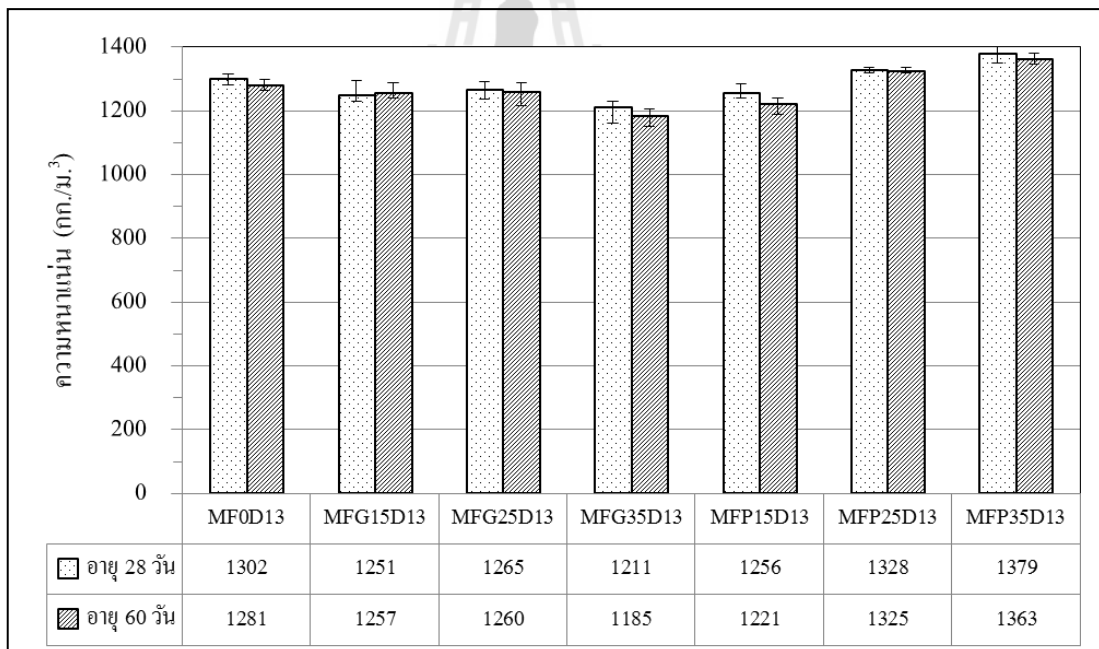
ชนิดทดสอบ	ความหนาแน่นแห้ง (กก./ม. ³)	
	อายุ 28 วัน	อายุ 60 วัน
MF0D10	1,008	997
MFG15D10	1,071	1,044
MFG25D10	997	992
MFG35D10	944	927
MFP15D10	1,051	1,016
MFP25D10	1,020	1,024
MFP35D10	1,002	978
MF0D11	1,105	1,062
MFG25D11	1,091	1,023
MFG25FA10D11	1,121	1,117
MFP25D11	1,122	1,110
MFP25FA10D11	1,116	1,114
MF0D13	1,302	1,281
MFG15D13	1,251	1,257
MFG25D13	1,265	1,260
MFG25FA10D13	1,311	1,324
MFG35D13	1,211	1,185
MFP15D13	1,256	1,221
MFP25D13	1,328	1,325
MFP25FA10D13	1,326	1,329
MFP35D13	1,379	1,363

ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเศษเมลามีนอายุ 28 และ 60 วัน จากการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ 1,000 กก./ม.³ แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 15 (MFG15D10), 25 (MFG25D10) และ 35 (MFG35D10) อายุ 28 วัน มีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1,071 997 และ 994 กก./ม.³ ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตมวลเบาดังกล่าวมีอายุ 60 วัน มีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1,044 992 และ 927 กก./ม.³ ตามลำดับ สำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 15 (MFP15D10), 25 (MFP25D10) และ 35 (MFP35D10) อายุ 28 วัน มีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1,051 1,020 และ 1,002 กก./ม.³ ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตมวลเบาดังกล่าวมีอายุได้ 60 วัน มีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1,016 1,024 และ 978 กก./ม.³ ตามลำดับ ซึ่งความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีความแปรปรวนจากการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ 1,000 กก./ม.³ เล็กน้อย (ไม่เกิน ± 73 กก./ม.³)



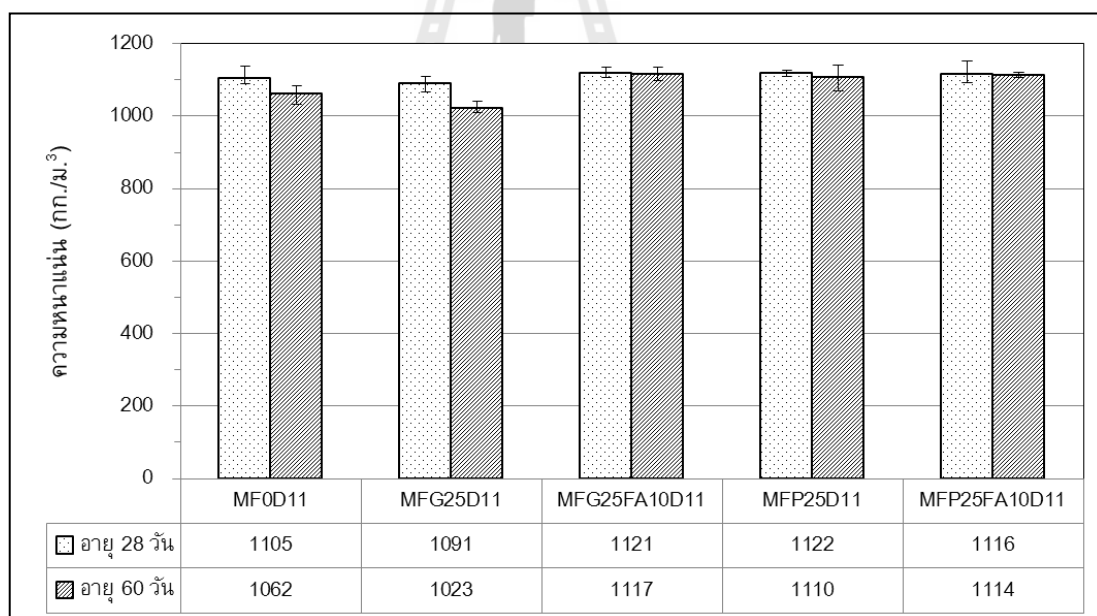
รูปที่ 4.5 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ 1,000 กก./ม.³

ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเศษเมลามีนอายุ 28 และ 60 วัน จากการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ 1,300 กก./ม.³ แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 15 (MFG15D13), 25 (MFG25D13) และ 35 (MFG35D13) อายุ 28 วัน มีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1,251 1,265 และ 1,211 กก./ม.³ ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตมวลเบาดังกล่าวมีอายุ 60 วัน มีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1,257 1,260 และ 1,185 กก./ม.³ ตามลำดับ สำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ (MFP15D13), 25 (MFP25D13) และ 35 (MFP35D13) อายุ 28 วัน มีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1,256 1,328 และ 1,379 กก./ม.³ ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตมวลเบาดังกล่าวอายุ 60 วัน มีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1,221 1,325 และ 1,363 กก./ม.³ ตามลำดับ ซึ่งความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีความแปรปรวนจากการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ 1,300 กก./ม.³ เล็กน้อย (ไม่เกิน ± 79 กก./ม.³)



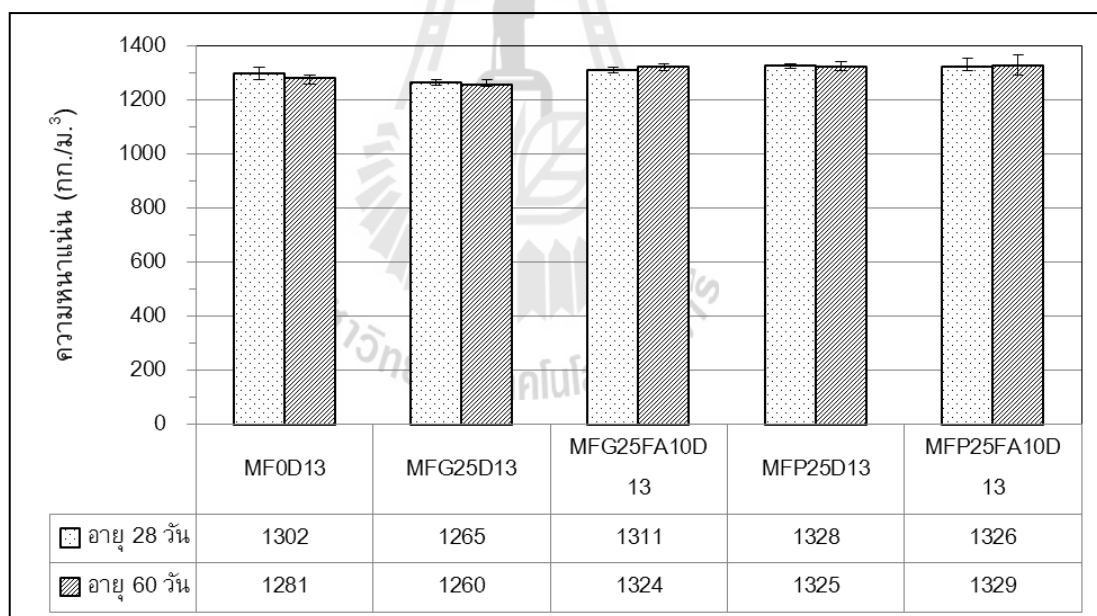
รูปที่ 4.6 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ 1,300 กก./ม.³

ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเศษเมลามีนอายุ 28 และ 60 วัน จากการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ 1,100 กก./ม.³ แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 (MFG25D11) และผสมเถ้าลอยในการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 (MFG25FA10D11) อายุ 28 วัน มีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1,091 และ 1,121 กก./ม.³ ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตมวลเบาดังกล่าวมีอายุ 60 วัน มีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1,023 และ 1,117 กก./ม.³ ตามลำดับ สำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 (MFP25D11) และผสมเถ้าลอยในการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 (MFP25FA10D11) อายุ 28 วัน มีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1,122 และ 1,116 กก./ม.³ ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตมวลเบาดังกล่าวมีอายุได้ 60 วัน มีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1,110 และ 1,114 กก./ม.³ ตามลำดับ ซึ่งความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีความแปรปรวนจากการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ 1,100 กก./ม.³ เล็กน้อย (ไม่เกิน ± 77 กก./ม.³)



รูปที่ 4.7 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ 1,100 กก./ม.³

ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเศษเมลามีนอายุ 28 และ 60 วัน จากการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ 1,300 กก./ม.³ แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 (MFG25D13) และผสมเถ้าลอยในการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 (MFG25FA10D13) อายุ 28 วัน มีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1,265 และ 1,311 กก./ม.³ ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตมวลเบาดังกล่าวมีอายุ 60 วัน มีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1,260 และ 1,324 กก./ม.³ ตามลำดับ สำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 (MFP25D13) และผสมเถ้าลอยในการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 (MFP25FA10D13) อายุ 28 วัน มีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1,328 และ 1,326 กก./ม.³ ตามลำดับ ขณะที่คอนกรีตมวลเบาดังกล่าวมีอายุได้ 60 วัน มีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1,325 และ 1,329 กก./ม.³ ตามลำดับ ซึ่งความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีความแปรปรวนจากการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ 1,300 กก./ม.³ เล็กน้อย (ไม่เกิน ± 40 กก./ม.³)



รูปที่ 4.8 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ 1,300 กก./ม.³

ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ พบว่า คอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน มีค่าความหนาแน่นแห้งแปรปรวนจากการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเล็กน้อย (น้อยกว่า ± 100 กก./ม.³) การแปรปรวนของความหนาแน่นแห้งเนื่องจากอิทธิพลของเศษเมลามีนที่มีผลต่อการผสมคอนกรีตมวลเบาดังต่อไปนี้

1) จากค่าการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีน (ร้อยละ 5.51) ที่สูงกว่าทราย (ร้อยละ 0.33) ทำให้ปริมาณน้ำในการผสมคอนกรีตมวลเบาเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแปรปรวนเล็กน้อย

2) รูปร่างอนุภาคของเศษเม็ดเมลามีนที่มีความเป็นก้อนแบน (รูปที่ 4.4 (ข)) และเศษฝุ่นเมลามีนมีความเป็นเหลี่ยมมุม (รูปที่ 4.4 (ค)) ซึ่งแตกต่างจากอนุภาคของทรายที่มีความกลมมน (รูปที่ 4.4 (ก)) ทำให้การกระจายตัวของเศษเมลามีนในคอนกรีตมวลเบาด้อยกว่าทราย เป็นผลให้ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแปรปรวนไปจากการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเล็กน้อย



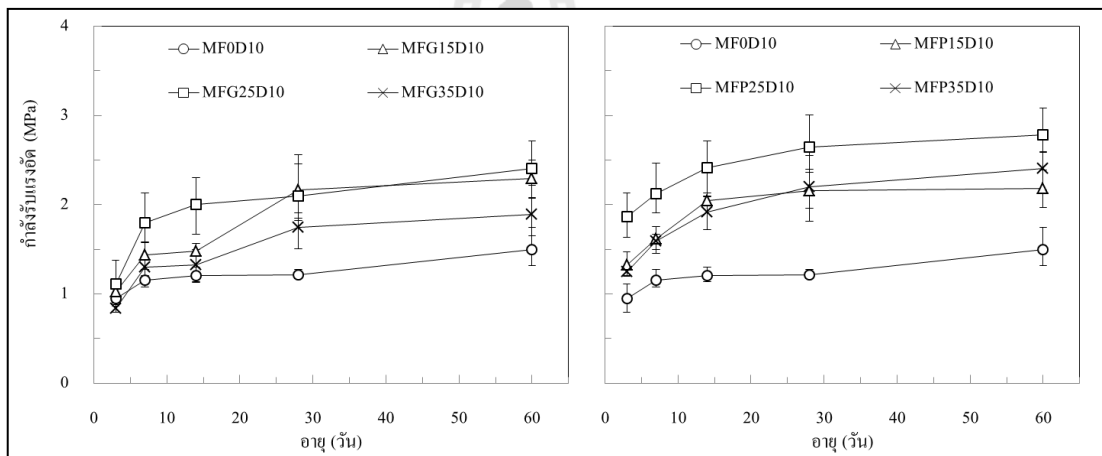
4.3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์อายุ 3 7 14 28 และ 60 วัน ที่ความหนาแน่น 1,000 1,100 และ 1,300 กก./ม.³ ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาจะพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องกับน้ำ โดยที่กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงแรกภายหลังจากการแข็งตัว แต่หลังจากอายุ 28 วัน กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ลดลง

ตารางที่ 4.4 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

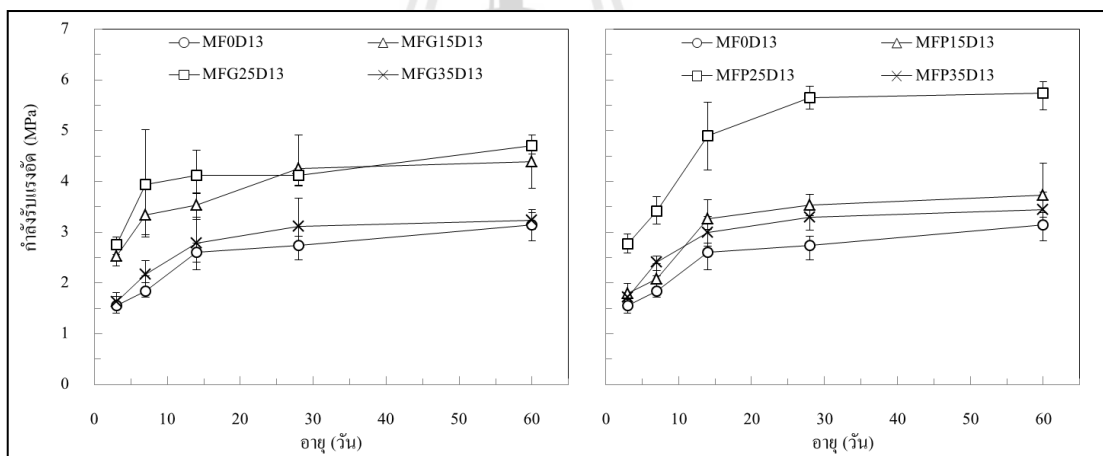
ชั้นทดสอบ	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสกาล)				
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน
MF0D10	0.95	1.15	1.21	1.21	1.49
MFG15D10	1.03	1.44	1.48	2.17	2.29
MFG25D10	1.11	1.79	2.00	2.09	2.41
MFG35D10	0.84	1.30	1.32	1.74	1.89
MFP15D10	1.33	1.62	2.05	2.16	2.18
MFP25D10	1.86	2.12	2.42	2.65	2.78
MFP35D10	1.25	1.59	1.92	2.20	2.40
MF0D11	1.32	1.61	1.62	1.79	2.09
MFG25D11	1.72	1.96	2.25	2.71	2.78
MFG25FA10D11	2.05	2.32	2.58	2.96	3.13
MFP25D11	2.31	2.56	2.92	3.49	3.80
MFP25FA10D11	2.80	3.15	3.41	3.91	4.22
MF0D13	1.56	1.83	2.61	2.74	3.14
MFG15D13	2.53	3.34	3.53	4.26	4.40
MFG25D13	2.76	3.95	4.11	4.12	4.70
MFG25FA10D13	3.13	3.87	4.50	5.39	5.78
MFG35D13	1.63	2.17	2.78	3.11	3.24
MFP15D13	1.79	2.09	3.27	3.54	3.73
MFP25D13	2.78	3.42	4.90	5.65	5.74
MFP25FA10D13	5.35	6.63	7.40	7.59	8.33
MFP35D13	1.72	2.42	2.99	3.30	3.44

รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเศษเมลามีนอายุ 3 7 14 28 และ 60 วัน ที่ความหนาแน่น 1,000 กก./ม.³ จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 15 (MFG15D10), 25 (MFG25D10) และ 35 (MFG35D10) ที่อายุ 3 7 14 28 และ 60 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1.03 1.44 1.48 2.17 2.29 เมกะพาสคัล, 1.11 1.79 2.00 2.09 2.41 เมกะพาสคัล และ 0.84 1.30 1.32 1.74 1.89 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ (MF0D10) ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 0.95 1.15 1.21 1.21 1.49 เมกะพาสคัล สำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 15 (MFP15D10), 25 (MFP25D10) และ 35 (MFP35D10) ที่อายุ 3 7 14 28 และ 60 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1.33 1.62 2.05 2.16 2.18 เมกะพาสคัล, 1.86 2.12 2.42 2.65 2.78 เมกะพาสคัล และ 1.25 1.59 1.92 2.20 2.40 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.9 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเศษเมลามีน
(ซ้าย) เม็ด (ขวา) ฝุ่น ความหนาแน่น 1,000 กก./ม.³

รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ผสมเศษเมลามีนอายุ 3 7 14 28 และ 60 วัน ความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³ แสดงดัง จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 15 (MFG15D13), 25 (MFG25D13) และ 35 (MFG35D13) ที่อายุ 3 7 14 28 และ 60 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 2.53 3.34 3.53 4.26 4.40 เมกะพาสคัล, 2.76 3.95 4.11 4.12 4.70 เมกะพาสคัล และ 1.63 2.17 2.78 3.11 3.24 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ (MF0D13) ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1.56 1.83 2.61 2.74 3.14 เมกะพาสคัล สำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 15 (MFP15D13), 25 (MFP25D13) และ 35 (MFP35D13) ที่อายุ 3 7 14 28 และ 60 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1.79 2.09 3.27 3.54 3.73 เมกะพาสคัล, 2.78 3.42 4.90 5.65 5.74 เมกะพาสคัล และ 1.72 2.42 2.99 3.30 3.44 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติเช่นเดียวกัน ซึ่งผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³ สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ความหนาแน่น 1,000 กก./ม.³



รูปที่ 4.10 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ผสมเศษเมลามีน (ซ้าย) เม็ด (ขวา) ฝุ่น ความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ผสมเศษเมลามีนอายุ 3 7 14 28 และ 60 วัน ความหนาแน่น 1,000 และ 1,300 กก./ม.³ (รูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ) แสดงให้เห็นว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีน (ทั้งแบบเม็ดและแบบฝุ่น) ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ โดยเฉพาะปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนร้อยละ 25 แสดงกำลังรับแรงอัดสูงสุด และมีค่าลดลงที่ปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนร้อยละ 15 และ 35 อีกทั้งยังพบว่าการแทนที่ทรายด้วยเศษฝุ่นเมลามีนส่งผลให้คอนกรีตมวลเบาที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าการแทนที่ทรายด้วยเศษเม็ดเมลามีน

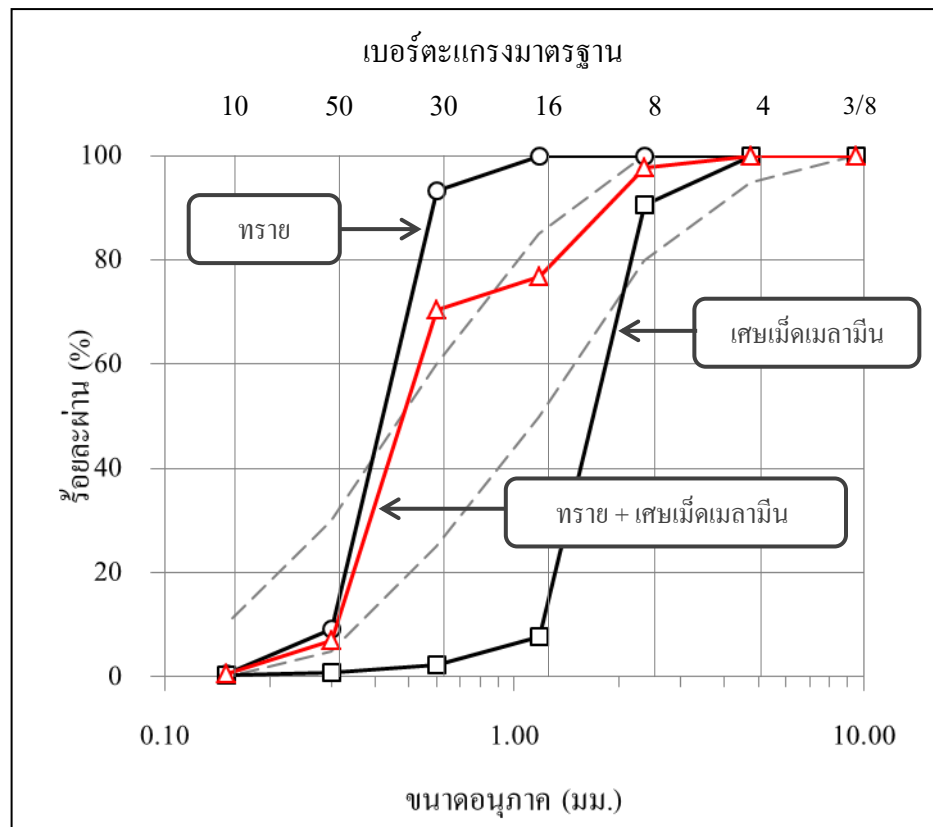
การแทนที่ทรายด้วยเศษฝุ่นเมลามีนร้อยละ 25 ที่ความหนาแน่น 1,000 และ 1,300 กก./ม.³ มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและผ่านเกณฑ์ความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อกมวลเบามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มาตรฐานเลขที่ มอก. 2601-2556 สำหรับคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 901-1,000 (C10) และ 1,201-1,400 (C14) ที่ความต้านทานแรงอัดไม่น้อยกว่า 2.5 และ 5.0 เมกะพาสคัล ตามลำดับ

การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนส่งผลให้กำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลต่อไปนี้

1) ความสามารถในการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีน (ทั้งแบบเม็ดและแบบฝุ่น) ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่บริเวณผิวของเศษเมลามีนสามารถเกิดขึ้นได้ กล่าวคือซีเมนต์เพสต์สามารถยึดเกาะบริเวณผิวของเศษเมลามีนได้ อีกทั้งการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนยังทำหน้าที่คล้ายสารลดน้ำพิเศษ ซึ่งสามารถลดน้ำส่วนเกินที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดช่องว่างในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้น

2) ด้วยเหตุที่เศษเมลามีนมีรูปร่างเหลี่ยมมุมและผิวที่ขรุขระเป็นรูโพร่ง ทำให้มีพื้นที่ผิวสำหรับยึดเหนี่ยว (bond) ระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์มีมากขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเศษฝุ่นเมลามีนที่มีพื้นผิวสัมผัสมาก ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนมีค่ามากกว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีน และคอนกรีตมวลเบาปกติตามลำดับ

3) การรวมกันระหว่างมวลรวมละเอียดทรายแม่น้ำและเศษเมลามีน ส่งผลให้เกิดขนาดคละของมวลรวมที่ดี (รูปที่ 4.11) ทำให้ช่องว่างของคอนกรีตมวลเบาลดลง กล่าวคือ คอนกรีตมวลเบาเกาะตัวกันดี ไม่แยกตัว (segregation) ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาดีขึ้น โดยเฉพาะการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนร้อยละ 25 ขณะที่การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนร้อยละ 35 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง เนื่องจาก ปริมาณเศษเมลามีนที่มากเกินไป ส่งผลให้ขนาดคละของมวลรวมที่ลดลง



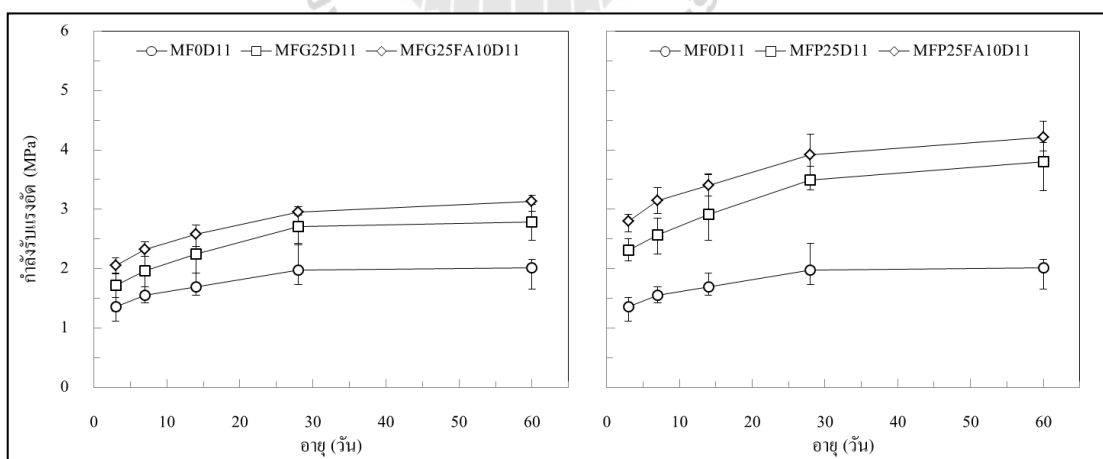
รูปที่ 4.11 การรวมกันระหว่างมวลรวมละเอียดทรายแม่น้ำและเศษเมลามิน

รูปที่ 4.11 แสดงขนาดผลของมวลรวมละเอียดทราย เศษเมลามิน และการรวมกันระหว่างมวลรวมละเอียดทรายและเศษเมลามิน จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่า มวลรวมละเอียดทรายมีขนาดอนุภาคค่อนข้างละเอียดโดยมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.97 อีกทั้งเศษเม็ดเมลามินมีขนาดอนุภาคค่อนข้างหยาบโดยมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.98 ขณะที่การรวมกันระหว่างมวลรวมละเอียดทราย (ร้อยละ 75) และเศษเมลามิน (ร้อยละ 25) ส่งผลให้เกิดขนาดผลของมวลรวมที่ดี ซึ่งดูได้จากเส้นสีแดงที่อยู่ภายในพื้นที่ของขอบเขตขนาดผลของมวลรวมละเอียดที่ดี (region of fine aggregates) ตามมาตรฐาน ASTM C33 และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.47

4) การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามิน ส่งผลให้ปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกากระหว่าง Na_2O และ K_2O กับมวลรวมทรายลดลง (ปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกาเป็นสาเหตุทำให้คอนกรีตขยายตัวและคอนกรีตแตกร้าว) ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น

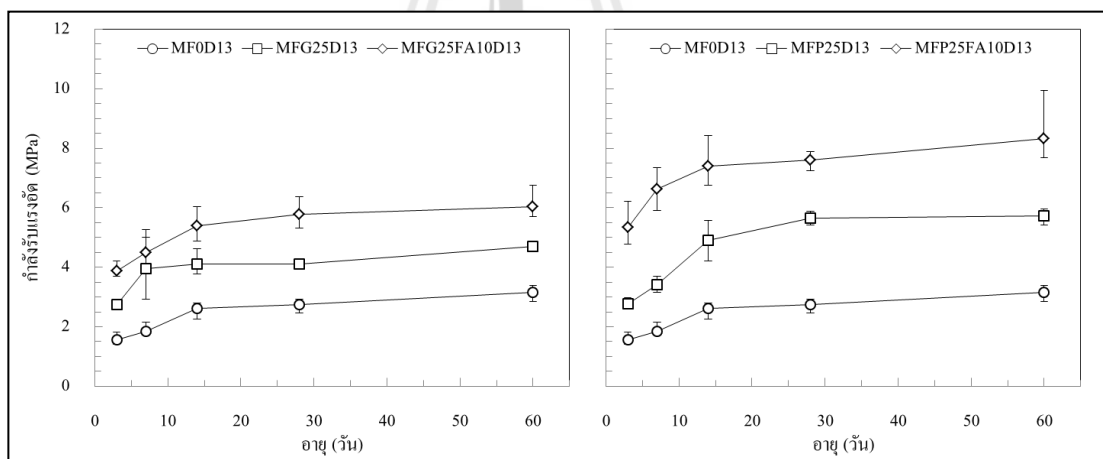
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนอายุ 3 7 14 28 และ 60 วัน ที่ความหนาแน่น 1,000 และ 1,300 กก./ม.³ ดังได้กล่าวมาแล้วนั้น ผู้วิจัยพบว่าการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนร้อยละ 25 แสดงกำลังรับแรงอัดสูงสุด ดังนั้นในขั้นต่อไป ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองผสมแก้าลอยโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ที่ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา 1,100 และ 1,300 กก./ม.³ โดยคาดหวังว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแก้าลอยจะสามารถปรับปรุงกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาได้ดีขึ้น ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนอายุ 3 7 14 28 และ 60 วัน ความหนาแน่น 1,100 กก./ม.³ แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 (MFG25D11) และการผสมแก้าลอยในการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 (MFG25FA10D11) อายุ 3 7 14 28 และ 60 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1.72 1.96 2.25 2.71 2.78 เมกะพาสคัล และ 2.05 2.32 2.58 2.96 3.13 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ (MF0D11) ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1.32 1.61 1.62 1.79 2.09 เมกะพาสคัล สำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 (MFP25D11) และผสมแก้าลอยในการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 (MFP25FA10D11) อายุ 3 7 14 28 และ 60 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 2.31 2.56 2.92 3.49 3.80 เมกะพาสคัล และ 2.80 3.15 3.41 3.91 4.22 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.12 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนร้อยละ 25 (ซ้าย) เม็ด (ขวา) ฝุ่น ความหนาแน่น 1,100 กก./ม.³

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนอายุ 3 7 14 28 และ 60 วัน ความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³ แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 (MFG25D13) และผสมเถ้าลอยในการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 (MFG25FA10D13) อายุ 3 7 14 28 และ 60 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 2.76 3.95 4.11 4.12 4.70 เมกะพาสคัล และ 3.13 3.87 4.50 5.39 5.78 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ (MF0D13) ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1.56 1.83 2.61 2.74 3.14 เมกะพาสคัล สำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 (MFP25D13) และผสมเถ้าลอยในการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 (MFP25FA10D13) อายุ 3 7 14 28 และ 60 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 2.78 3.42 4.90 5.65 5.74 เมกะพาสคัล และ 5.35 6.63 7.40 7.59 8.33 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ เช่นเดียวกัน ซึ่งผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าลอยที่ความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³ สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าลอยที่ความหนาแน่น 1,100 กก./ม.³



รูปที่ 4.13 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนร้อยละ 25 (ซ้าย) เม็ด (ขวา) ฝุ่น ความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนอายุ 3 7 14 28 และ 60 วัน ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 กก./ม.³ แสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนและคอนกรีตมวลเบาปกติ โดยปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 และแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนร้อยละ 25 (ทั้งเศษเม็ดและเศษฝุ่นเมลามีน) แสดงกำลังรับแรงอัดสูงสุด และผ่านเกณฑ์ความต้านทานแรงอัดของ มอก. 2601-2556 สำหรับคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1,001-1,200 (C12) และ 1,201-1,400 (C14) ที่ความต้านทานแรงอัดไม่น้อยกว่า 2.5 และ 5.0 เมกะพาสคัล ตามลำดับ

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยส่งผลให้กำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลต่อไปนี้

- 1) การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ (ปริมาณ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF) ในคอนกรีตลดลง ทำให้ปฏิกิริยาของสารซีเมนต์ช้าลง กล่าวคือ การคายความร้อนจากปฏิกิริยาชะลอตัวออกไป ส่งผลให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง คอนกรีตจึงอยู่ในสภาพพลาสติกนานขึ้น ทำให้โพรงของคอนกรีตมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มมากขึ้น
- 2) การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) กับซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ทำให้ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ซึ่งสารประกอบทั้งสองมีคุณสมบัติยึดประสาน อีกทั้งเถ้าลอยที่ใช้เป็นเถ้าลอย class C ซึ่งมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในปริมาณสูง (ร้อยละ 13.56) ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มมากขึ้น
- 3) เถ้าลอยที่มีรูปร่างกลมมนผิวเรียบและอนุภาคที่เล็ก ทำให้เกิดการกระจายตัวในซีเมนต์เพสต์ได้ดี ส่งผลให้การกระจายตัวของปูนซีเมนต์ดีขึ้นด้วย ทำให้ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตดีขึ้น ส่งผลให้โพรงในคอนกรีตลดลง อีกทั้งอนุภาคของเถ้าลอยยังสามารถเป็นตัวแทรก (filler) เข้าไปอุดช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างปูนซีเมนต์กับมวลรวมละเอียด ทำให้ซีเมนต์เพสต์แน่นขึ้น เป็นผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มมากขึ้น (ปริญญา, 2553)

4.4 ผลวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k factorial design) เป็นการทดลองเพื่อคัดกรองจำนวนปัจจัย (factor screening experiment) ที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนอง (respond) อย่างมีนัยสำคัญ โดยศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลัก (main effects) และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (interaction effects) พร้อมกัน ในขณะที่ทำการทดลอง และศึกษาความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรง (linear model)

การศึกษาครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อต้องการรีไซเคิลเศษเมลามีนโดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายบางส่วนของคนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ ซึ่งหากผู้วิจัยทำการกำหนดระดับของปัจจัยในการทดลองหลาย ๆ ระดับ จะเกิดความยุ่งยากและเสียค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบ ดังนั้นเพื่อเป็นการลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการทดลอง โดยมี 3 ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ และเพิ่มจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัย

ปัจจัย (Factor)	รหัส	ระดับของปัจจัย (Level)
เศษเมลามีน (A)	-1	แทนที่ทรายด้วยเศษเม็ดเมลามีนร้อยละ 25
	0	แทนที่ทรายด้วยเศษเม็ดและเศษฝุ่นเมลามีนร้อยละ 25 (50% : 50%)
	+1	แทนที่ทรายด้วยเศษฝุ่นเมลามีนร้อยละ 25
เถ้าลอย (B)	-1	ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย
	0	แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 5
	+1	แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10
ความหนาแน่น (C)	-1	ความหนาแน่นของคนกรีตมวลเบาเท่ากับ 1,100 กก./ม. ³
	0	ความหนาแน่นของคนกรีตมวลเบาเท่ากับ 1,200 กก./ม. ³
	+1	ความหนาแน่นของคนกรีตมวลเบาเท่ากับ 1,300 กก./ม. ³

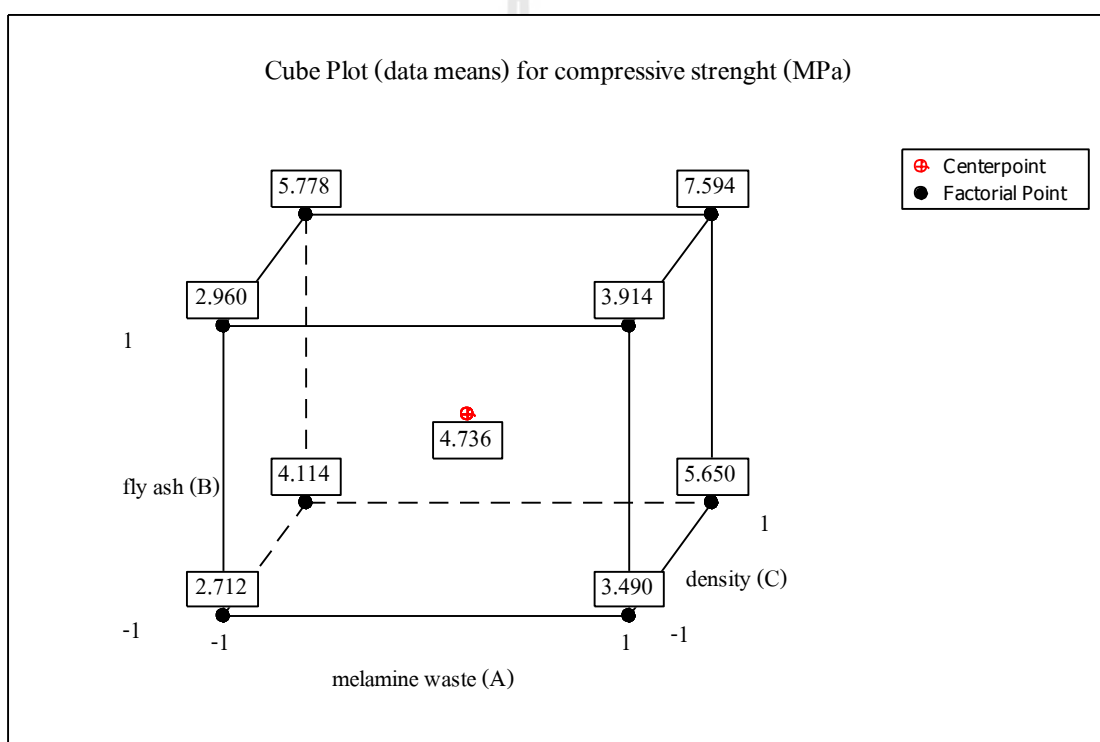
การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับครั้งนี้ ผู้วิจัยมิได้มีการจัดลำดับ (run) การทดลองให้เป็นแบบสุ่ม (random) เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านการขึ้นรูปชิ้นทดสอบของคอนกรีตมวลเบาที่มีความยุ่งยาก ดังนั้น เพื่อเป็นการลดอคติ (bias) ของการทดลองที่อาจเกิดขึ้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองซ้ำที่ระดับปัจจัยต่าง ๆ เป็นจำนวน 5 ซ้ำ (5 replicate) โดยมีผลตอบสนองคือค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาและมีการเพิ่มจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ ที่มีการทดลองซ้ำ 5 ซ้ำ และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย ของการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา

รหัสผสม	ระดับของปัจจัย			กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคัล)					
	เวลา มีน	ถ้า ลอย	ความ หนาแน่น	ทดสอบ ครั้งที่ 1	ทดสอบ ครั้งที่ 2	ทดสอบ ครั้งที่ 3	ทดสอบ ครั้งที่ 4	ทดสอบ ครั้งที่ 5	ค่า เฉลี่ย
MFG25D11	-1	-1	-1	2.40	2.90	2.72	2.90	2.64	2.71
MFP25D11	1	-1	-1	3.72	3.33	3.44	3.36	3.60	3.49
MFG25FA10D11	-1	1	-1	2.96	2.99	2.80	3.01	3.04	2.96
MFP25FA10D11	1	1	-1	3.50	3.92	4.26	3.72	4.17	3.91
MFG25D13	-1	-1	1	3.92	4.22	4.04	4.14	4.25	4.11
MFP25D13	1	-1	1	5.66	5.77	5.42	5.87	5.53	5.65
MFG25FA10D13	-1	1	1	5.53	6.24	6.37	5.44	5.31	5.78
MFP25FA10D13	1	1	1	7.60	7.88	7.83	7.41	7.25	7.59
MFGP25FA5D12	0	0	0	4.85	4.14	4.83	4.88	4.98	4.74

เพื่อให้การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 แฟกทอเรียล มีความสะดวกและรวดเร็ว ผู้วิจัยจึงใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab Version 16 ช่วยในการคำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองของคอนกรีตมวลเบา ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$)

จากค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาในแต่ละทริทเมนต์คอมบินเนชันของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับและจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทริทเมนต์คอมบินเนชัน ในแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ทริทเมนต์คอมบินเนชันของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา

4.4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแผนการทดลองกำลังรับแรงอัด

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (model adequacy checking) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความเพียงพอของรูปแบบทางสถิติของแผนการทดลอง ผลการตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 4.15 โดยมีสมมติฐานคือ รูปแบบของส่วนตกค้าง (residuals) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลอง มีการแจกแจงแบบปกติ และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียงศูนย์ และ σ^2 มีค่าคงตัว (stability) จึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยการตรวจสอบมี 4 ขั้นตอน ดังนี้

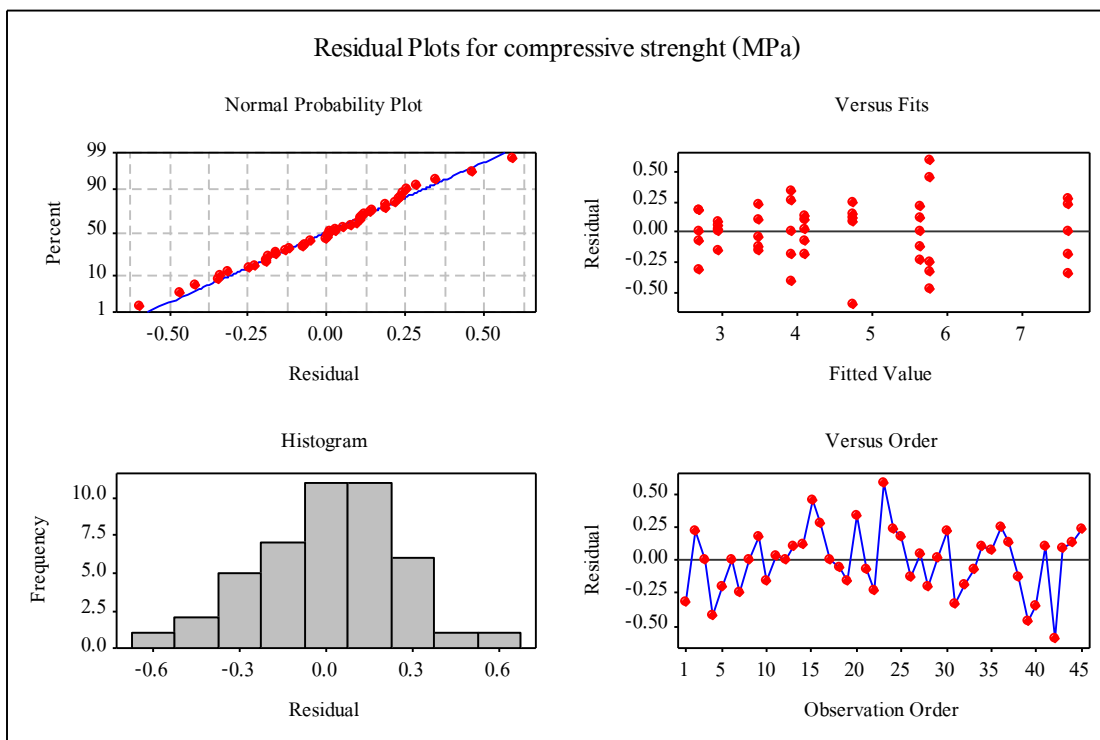
1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (normal distribution) ของส่วนตกค้าง (residuals) แสดงดังรูปที่ 4.15 (บนซ้าย) พบว่า ค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

2) การตรวจสอบความเสถียรภาพของ σ^2 (variance stability) แสดงดังรูปที่ 4.15 (บนขวา) พบว่า σ^2 ของส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง และไม่พบารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างใด ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวน

3) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (independent) ของส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 4.15 (ล่างขวา) พบว่า การกระจายตัวของส่วนตกค้างมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

4) การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 4.15 (ล่างซ้าย) พบว่า ส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัยที่กระจายในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้าง มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับศูนย์

จากการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่า รูปแบบส่วนตกค้างของผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดมีความเหมาะสมกับรูปแบบทางสถิติของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 แฟกทอเรียล



รูปที่ 4.15 การตรวจสอบความถูกต้องของแผนการทดลองกำลังรับแรงอัด



4.4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance; ANOVA) ของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบกำลังรับแรงอัด เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ($\alpha=0.05$) ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล

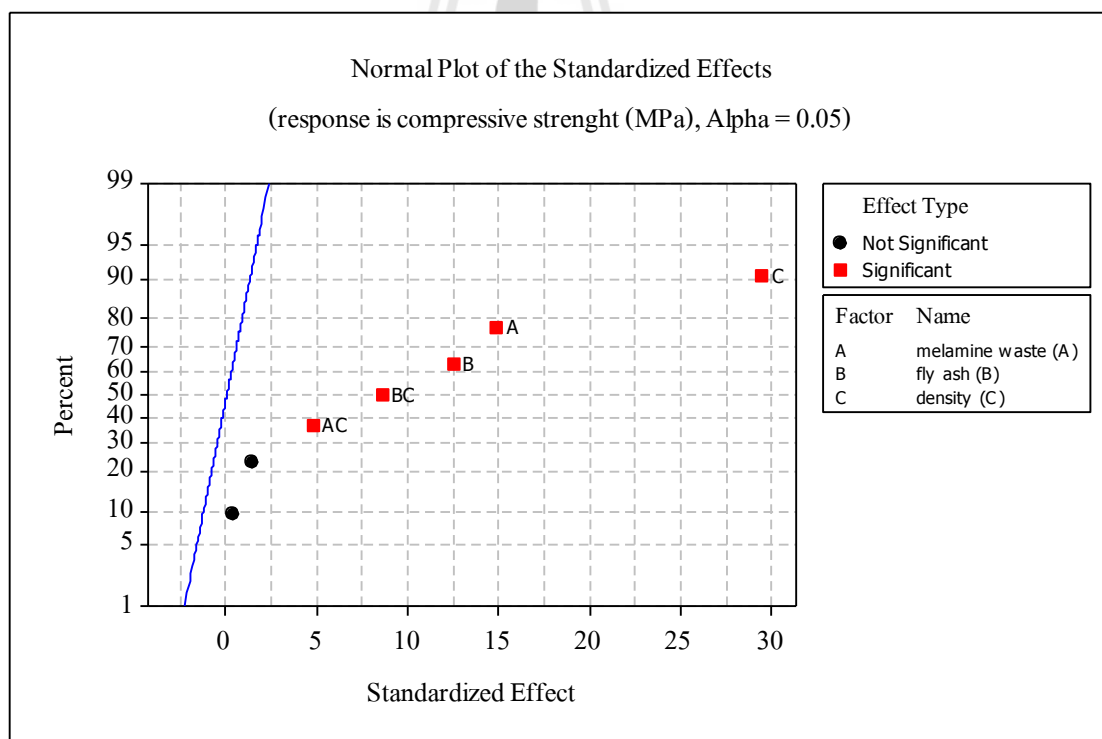
และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
ค่าคงที่		4.5265	0.04267	106.07	0.000
รูปแบบเศษ (A)	1.271	0.6355	0.04267	14.89	0.000
เนื้อล้อย (B)	1.070	0.535	0.04267	12.54	0.000
ความหนาแน่น (C)	2.515	1.2575	0.04267	29.47	0.000
AB	0.114	0.0570	0.04267	1.34	0.190
AC	0.405	0.2025	0.04267	4.75	0.000
BC	0.734	0.3670	0.04267	8.60	0.000
ABC	0.026	0.0130	0.04267	0.3	0.762
S = 0.269899		R-Sq = 97.40%		R-Sq(adj) = 96.82%	

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา

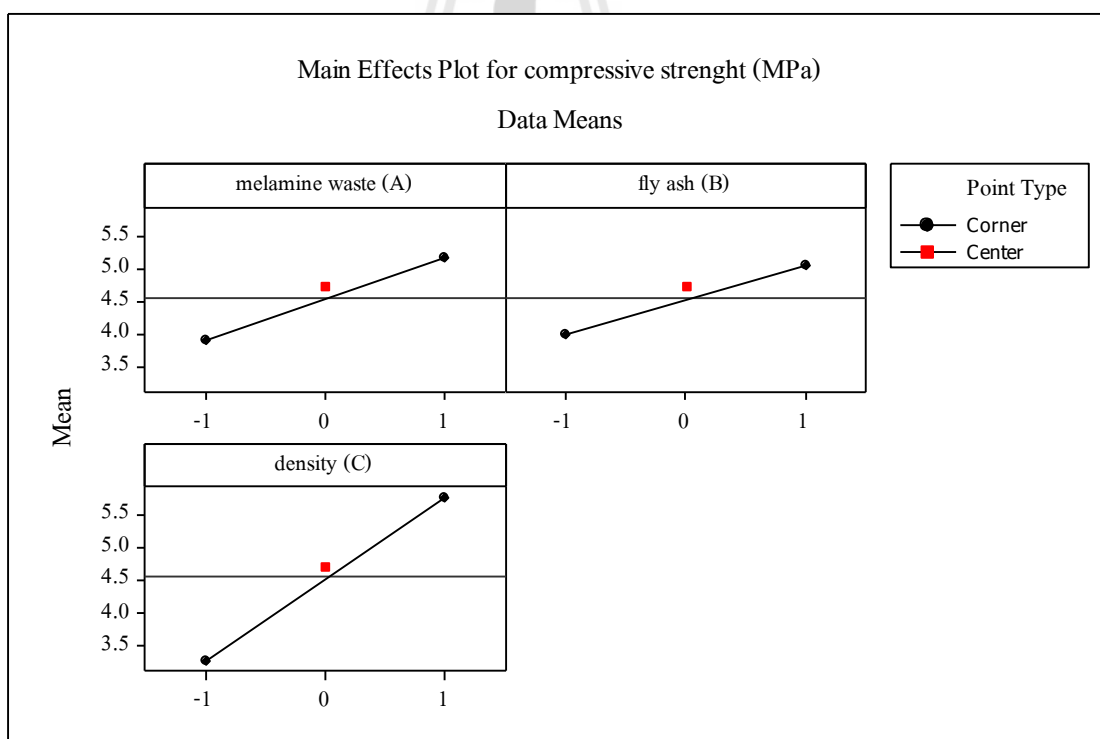
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	90.856	90.8557	30.2852	415.75	0.000
2-Way Interactions	3	7.158	7.1578	2.3859	32.75	0.000
3-Way Interactions	1	0.007	0.0068	0.0068	0.09	0.762
Curvature	1	0.195	0.1951	0.1951	2.68	0.110
Residual Error	36	2.622	2.6224	0.0728		
Pure Error	36	2.622	2.6224	0.0728		
Total	44	100.838				

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 4.15 พบว่า อิทธิพลเนื่องจากปัจจัยหลักทั้งสามประกอบด้วย เศษเมลามีน (A), เถ้าลอย (B), และความหนาแน่น (C) และอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย ประกอบด้วย เศษเมลามีนกับความหนาแน่น (AC) และเถ้าลอยกับความหนาแน่น (BC) มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} < 0.05$) ในขณะที่อิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัยของ เศษเมลามีนกับเถ้าลอย (AB) และอิทธิพลร่วมระหว่างสามปัจจัยของ เศษเมลามีน เถ้าลอยและความหนาแน่น (ABC) ไม่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} > 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.16 ที่แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยหลักทั้งสาม (A, B และ C) และอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย (AC และ BC) มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วันอย่างมีนัยสำคัญ โดยสังเกตได้จากจุดของปัจจัย A, B, C, AC และ BC มีแนวโน้มไม่ได้อยู่บนเส้นตรงของแผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติของตัวประมาณอิทธิพลใด ๆ



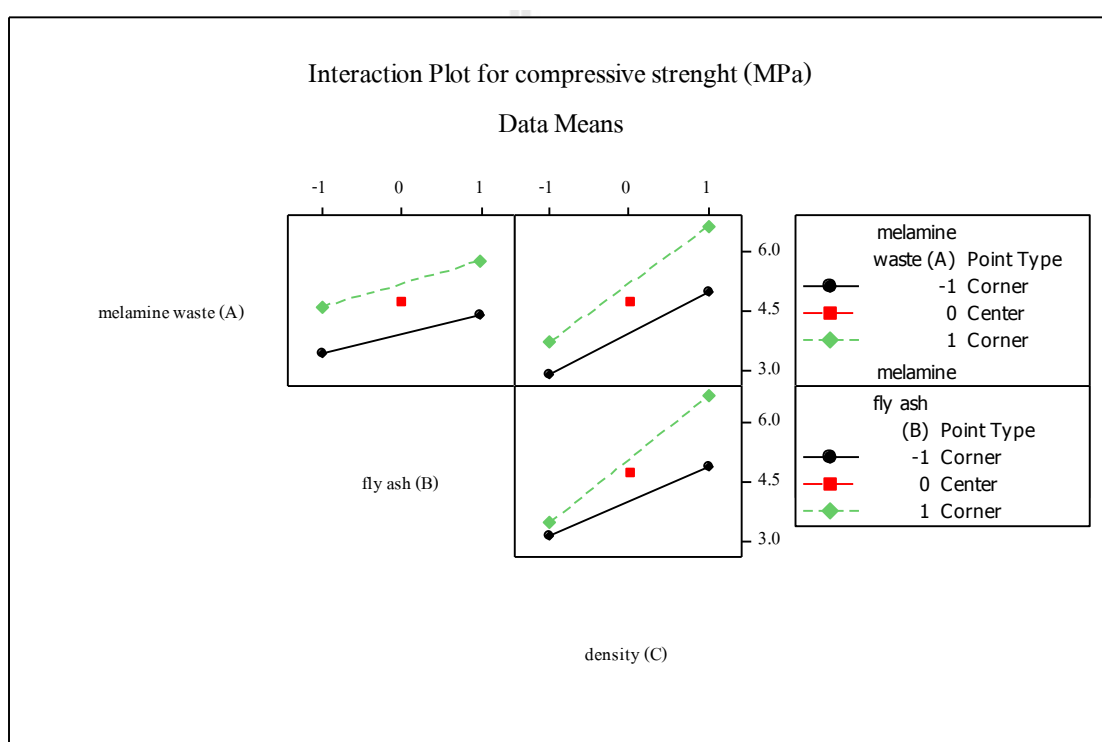
รูปที่ 4.16 ความน่าจะเป็นแบบปกติของตัวประมาณของอิทธิพลทั้งหมดของกำลังรับแรงอัด

จากการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (main effect plot) ทั้งสามปัจจัย ประกอบด้วย เศษเมลามีน (A), เถ้าลอย (B), และความหนาแน่น (C) ที่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่า ความชันของปัจจัยหลักทั้งสามมีค่าเป็นบวกหมายถึง การเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่งหน่วยเป็นผลทำให้ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองเพิ่มขึ้น กล่าวคือ อิทธิพลของความหนาแน่น (C) มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วันเพิ่มขึ้นมากที่สุด รองลงมาคือปัจจัยเศษเมลามีน (A) และเถ้าลอย (B) ตามลำดับ อีกทั้ง รูปแบบสมการถดถอยของค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของตำแหน่งจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย 5 ชั่วโมง มีแนวโน้มเป็นเชิงเส้น ซึ่งดูได้จาก ค่า p-value ของ curvature (ตารางที่ 4.8) ที่สูงกว่าระดับนัยสำคัญ ($\alpha=0.05$) และดูได้จาก จุด center (รูปที่ 4.17) ที่ใกล้เคียงกับเส้นของอิทธิพลหลัก แสดงให้เห็นว่า ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของทุกทริทเมนต์คอมบิเนชัน ที่เกิดจากการออกแบบการทดลอง 2^3 แฟกทอเรียล และค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของตำแหน่งจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย 5 ชั่วโมง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ



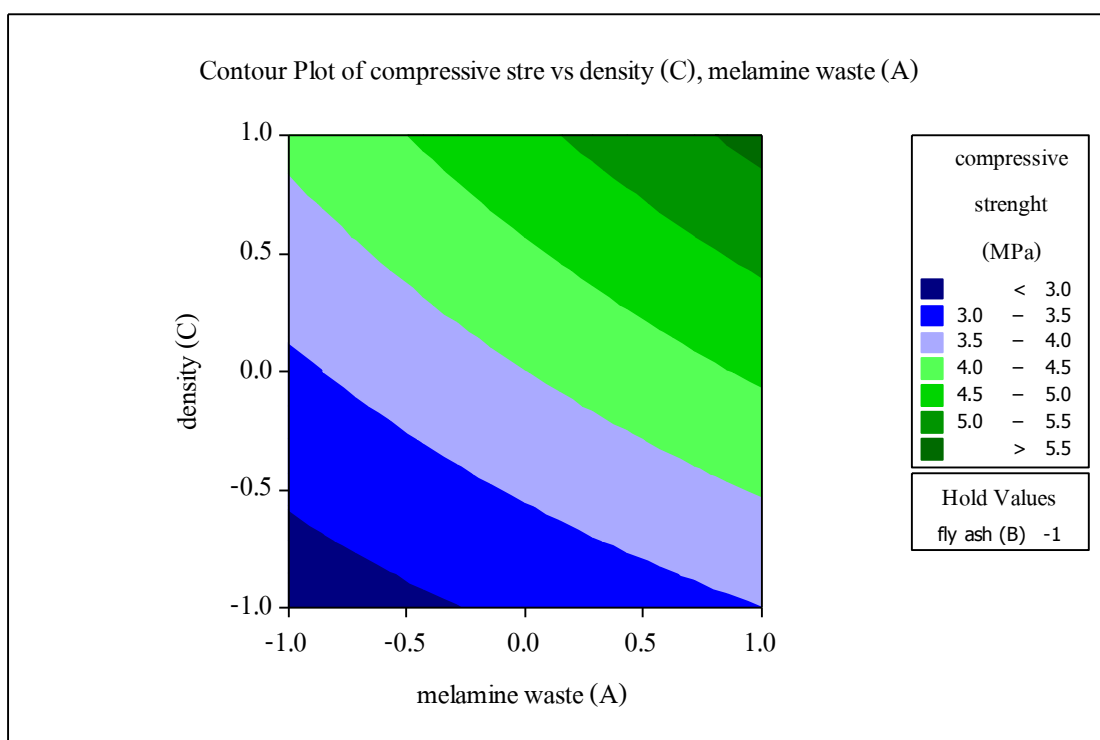
รูปที่ 4.17 การประมาณอิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลอง 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา

จากการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย (interaction plot) แสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่า ความชันของอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัยทั้งสามมีค่าเป็นบวกหมายถึง การเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่งหน่วยเป็นผลทำให้ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองเพิ่มขึ้น อีกทั้ง อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยเศษเมลามีนกับความหนาแน่น (AC) และ เถ้าลอยกับความหนาแน่น (BC) มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วันเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งดูได้จากความชันที่แตกต่างกัน ขณะที่อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยเศษเมลามีนกับเถ้าลอย (AB) ไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วันอย่างมีนัยสำคัญ ดูได้จากความชันที่ใกล้เคียงกัน

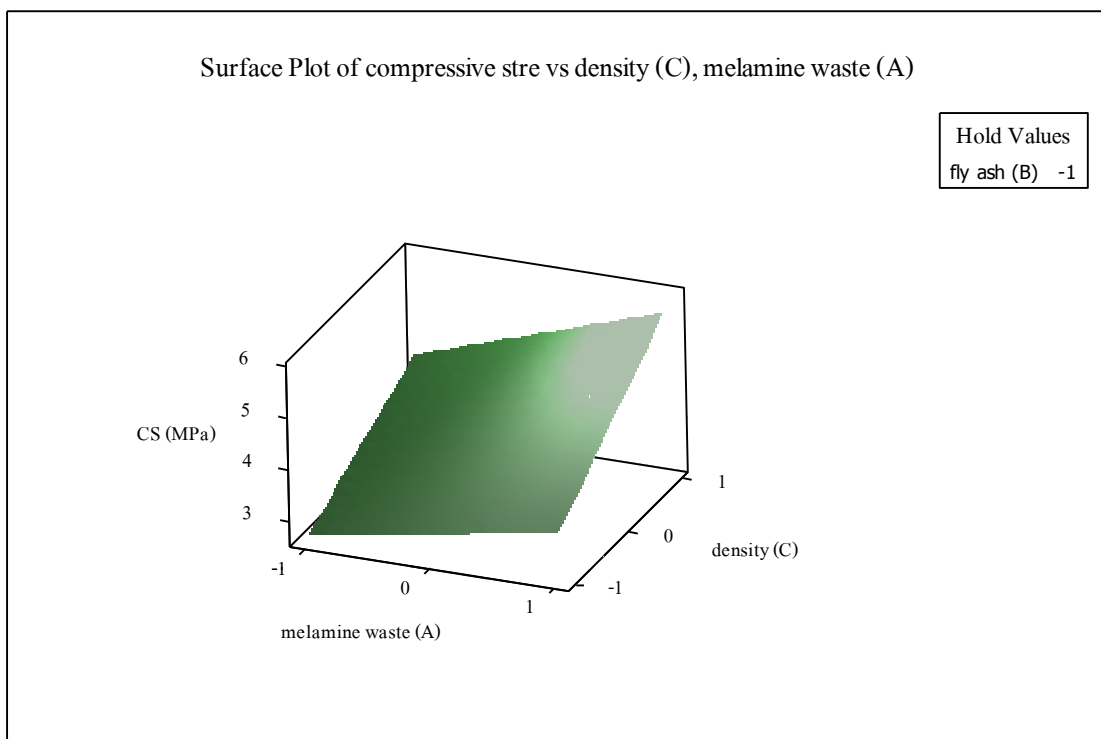


รูปที่ 4.18 การประมาณอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของแผนการทดลอง 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา

การประมวลผลในลักษณะของวิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (steepest ascent) สามารถแสดงผลลัพธ์ออกมาเป็นแผนภาพโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัยเศษเมลามีน (A) และความหนาแน่น (C) แสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 พบว่า การเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยเศษเมลามีน (จากเศษเม็ดเป็นเศษฝุ่นเมลามีน) และ การเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยความหนาแน่น (จาก 1,100 เป็น 1,300 กก./ม.³) ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน เพิ่มมากขึ้น



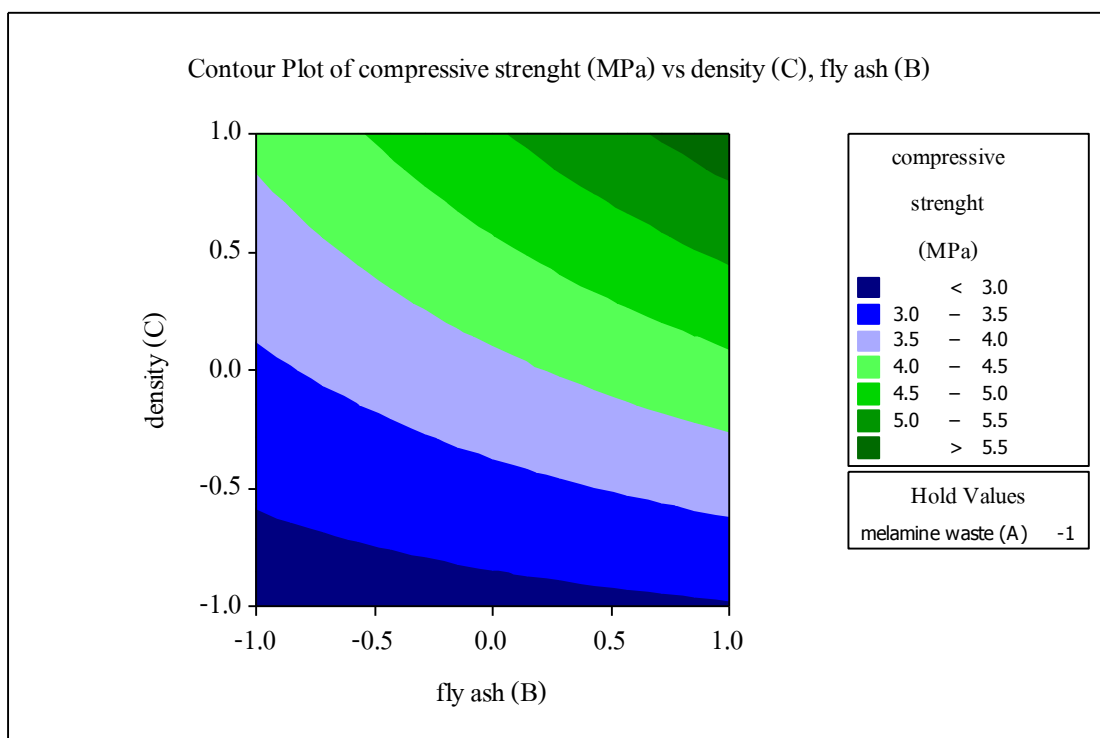
รูปที่ 4.19 โครงร่างระหว่าง ปัจจัยเศษเมลามีน (A) และความหนาแน่น (C)



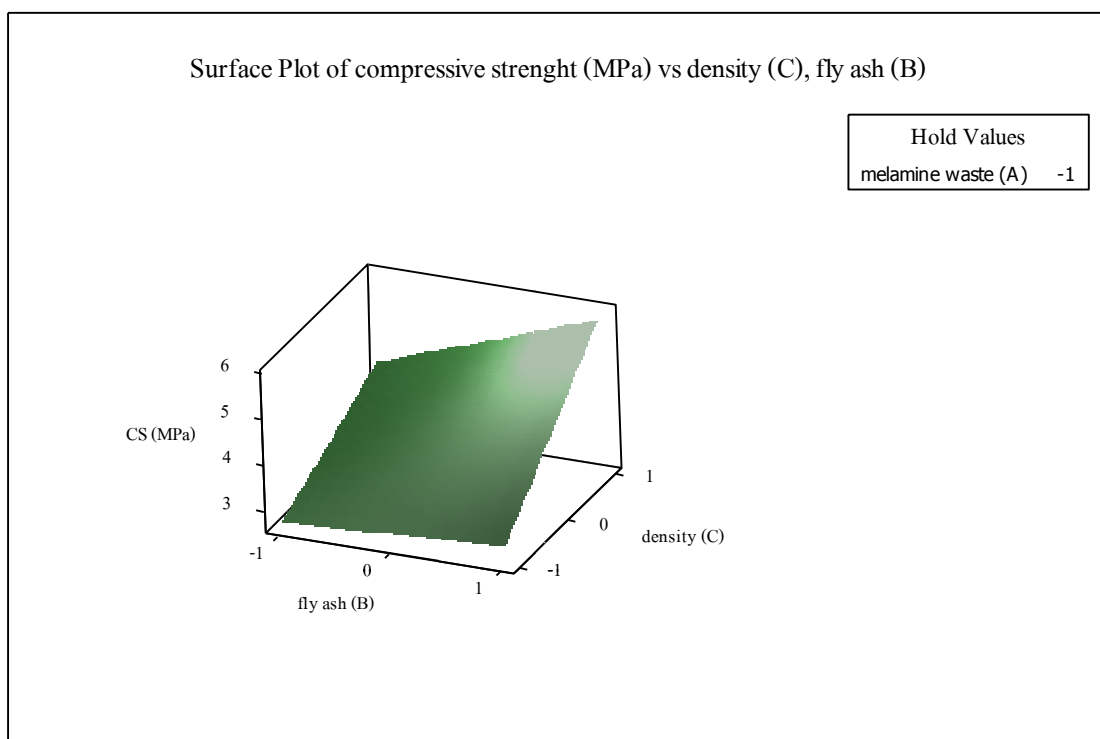
รูปที่ 4.20 พื้นผิวตอบสนองระหว่าง ปริมาณเศษเมลามีน (A) และความหนาแน่น (C)



การวิเคราะห์แผนภาพโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองระหว่างปี้จี้ช ปี้จี้ชเถ้าลอย (B) และความหนาแน่น (C) แสดงดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 พบว่า การเปลี่ยนแปลงระดับของปี้จี้ชเถ้าลอย (จากไม่ผสมเถ้าลอยเป็นผสมเถ้าลอยร้อยละ 10) และการเปลี่ยนแปลงระดับของความหนาแน่น (จาก 1,100 เป็น 1,300 กก./ม.³) ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา อายุ 28 วัน เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.21 โครงร่างระหว่าง ปี้จี้ชเถ้าลอย (B) และความหนาแน่น (C)



รูปที่ 4.22 พื้นผิวตอบสนองระหว่าง ปัจจัยเถ้าลอย (B) และความหนาแน่น (C)

4.4.3 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 แฟกทอเรียล สามารถสร้างแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้น (linear regression model) เพื่อแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ โดยการพิจารณาอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วันอย่างมีนัยสำคัญ ได้ดังนี้

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

โดยที่

Y = ผลตอบสนอง

A = เศษเมลามีน

B = เถ้าลอย

C = ความหนาแน่น

β_0 = ค่าคงที่ของสัมประสิทธิ์การถดถอย

β_1 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยเศษเมลามีน

β_2 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยเก้าลอย

β_3 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยความหนาแน่น

β_4 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของเศษเมล็ดมีนกับเก้าลอย

β_5 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของเศษเมล็ดมีนกับความหนาแน่น

β_6 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของเก้าลอยกับความหนาแน่น

β_7 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของเศษเมล็ดมีนเก้าลอยและความหนาแน่น

สมการที่ 4.1 แสดงแบบจำลองการถดถอยแบบเต็มรูป (full regression model) โดยปกติแล้ว การสร้างแบบจำลองการถดถอย มักจะเลือกเฉพาะปัจจัยที่มีนัยสำคัญมาสร้างเป็นแบบจำลองเท่านั้น ซึ่งดูได้จากค่า p-value ของแต่ละปัจจัย (ตารางที่ 4.7) กล่าวคือ หากปัจจัยใดมีค่า p-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ($\alpha=0.05$) แสดงว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในทางกลับกัน หากปัจจัยใดมีค่า p-value มากกว่าระดับนัยสำคัญ ($\alpha=0.05$) แสดงว่าปัจจัยนั้นไม่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น หากผู้วิจัยทำการตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออก (p-value > 0.05) จะสามารถเขียนแบบจำลองการถดถอย ได้ดังสมการที่ 4.2

$$Y_{CS} = 4.53 + 0.64A + 0.54B + 1.26C + 0.20AC + 0.36BC \quad (4.2)$$

เมื่อพิจารณาค่า R^2 (adj) แสดงดังตาราง 4.7 พบว่า ระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม มีความสัมพันธ์กันในระดับดีมาก โดยมีค่าเท่ากับ 96.82% และแบบจำลองการถดถอยแสดงดังสมการที่ 4.2 ผู้วิจัยสามารถใช้ทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาจากการออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตได้ หรือใช้กำหนดระดับปัจจัยเพื่อให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นจากการออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีต ให้มีค่ากำลังรับแรงอัดเป็นไปตามที่ต้องการได้ แต่มีข้อจำกัดที่ระดับปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นจะต้องอยู่ในช่วงระดับที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

4.4.4 การกำหนดระดับของปัจจัยเพื่อทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา

ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดระดับของปัจจัยต่าง ๆ จำนวน 4 การออกแบบสี่ด้านผสม ประกอบด้วย ระดับของปัจจัยเศษเมลามีน ถ้าวลอย และความหนาแน่นเท่ากับ (0, -1, -1) (0, 1, -1) (0, -1, 1) และ (0, 1, 1) ตามลำดับ โดยมีปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยแสดงดังตารางที่ 4.9 ซึ่งผลทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน สามารถหาได้จากการแทนระดับของแต่ละปัจจัยลงในแบบจำลองการถดถอย (สมการที่ 4.2) โดยผลทำนายค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 3.10 3.44 4.88 และ 6.69 เมกะพาสกาล ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 การกำหนดระดับของปัจจัยเพื่อทำนายค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา

รหัสผสม	ระดับของปัจจัย			กำลังรับแรงอัด (MPa)
	เศษเมลามีน	ถ้าวลอย	ความหนาแน่น	ทำนาย
MFGP25D11	0	-1	-1	3.10
MFGP25FA10D11	0	1	-1	3.44
MFGP25D13	0	-1	1	4.88
MFGP25FA10D13	0	1	1	6.69

4.4.5 การทดสอบยืนยันผลการทำนายค่ากำลังรับแรงอัด

ผู้วิจัยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน เพื่อเปรียบเทียบผลทำนายจากสมการแบบจำลองการถดถอย ของปัจจัยเศษเมลามีน ถ้าวลอย และความหนาแน่นเท่ากับ (0, -1, -1) (0, 1, -1) (0, -1, 1) และ (0, 1, 1) จำนวน 5 ซ้ำ ของแต่ละการออกแบบสี่ด้านผสม ซึ่งค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน เท่ากับ 3.41 3.35 5.19 และ 6.71 เมกะพาสกาล ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.10

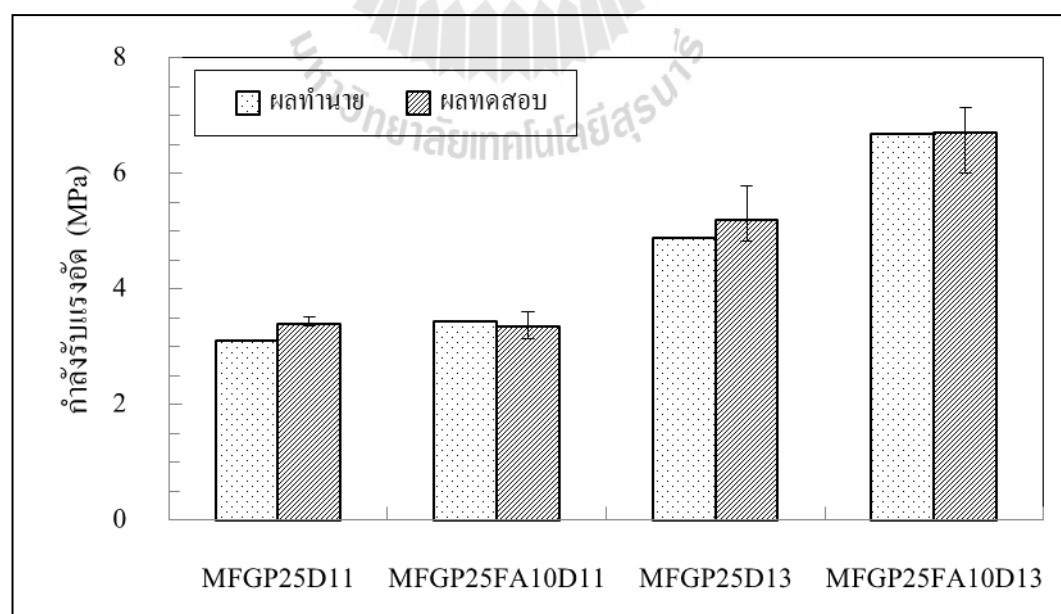
ตารางที่ 4.10 การกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง

รหัสผสม	ระดับของปัจจัย			กำลังรับแรงอัด (เมกะพาสกาล)					
	เศษเมลามีน	ถ้าวลอย	ความหนาแน่น	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	ค่าเฉลี่ย
MFGP25D11	0	-1	-1	3.64	3.42	3.49	2.91	3.58	3.41
MFGP25FA10D11	0	1	-1	3.62	3.14	3.16	3.38	3.45	3.35
MFGP25D13	0	-1	1	4.87	5.37	5.78	4.85	5.10	5.19
MFGP25FA10D13	0	1	1	6.01	6.68	6.96	7.15	6.75	6.71

ตารางที่ 4.11 แสดงผลเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน ระหว่างผลทำนายจากแบบจำลองการถดถอยและผลการทดสอบจริง ที่ระดับของปัจจัยเศษเมลามีน ใ้ล้อย และความหนาแน่น (0, -1, -1) (0, 1, -1) (0, -1, 1) และ (0, 1, 1) ตามลำดับ เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือและความคลาดเคลื่อนของสมการแบบจำลองการถดถอย จากการเปรียบเทียบพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน ที่ได้จากผลการทำนายและผลการทดสอบจริง มีความใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.23 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 4.50

ตารางที่ 4.11 ผลเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน
ของผลทำนายและผลการทดสอบจริง

ลำดับ ที่	รหัสผสม	ระดับของปัจจัย			กำลังรับแรงอัด (MPa)		ความคลาด เคลื่อน (ร้อยละ)
		เศษ เมลามีน	ใ้ล้อย	ความ หนาแน่น	ทำนาย	ทดสอบ	
1	MFGP25D11	0	-1	-1	3.10	3.41	9.09
2	MFGP25FA10D11	0	1	-1	3.44	3.35	2.60
3	MFGP25D13	0	-1	1	4.88	5.19	5.93
4	MFGP25FA10D13	0	1	1	6.69	6.71	0.36



รูปที่ 4.23 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน
ของผลทำนายและผลการทดสอบจริง

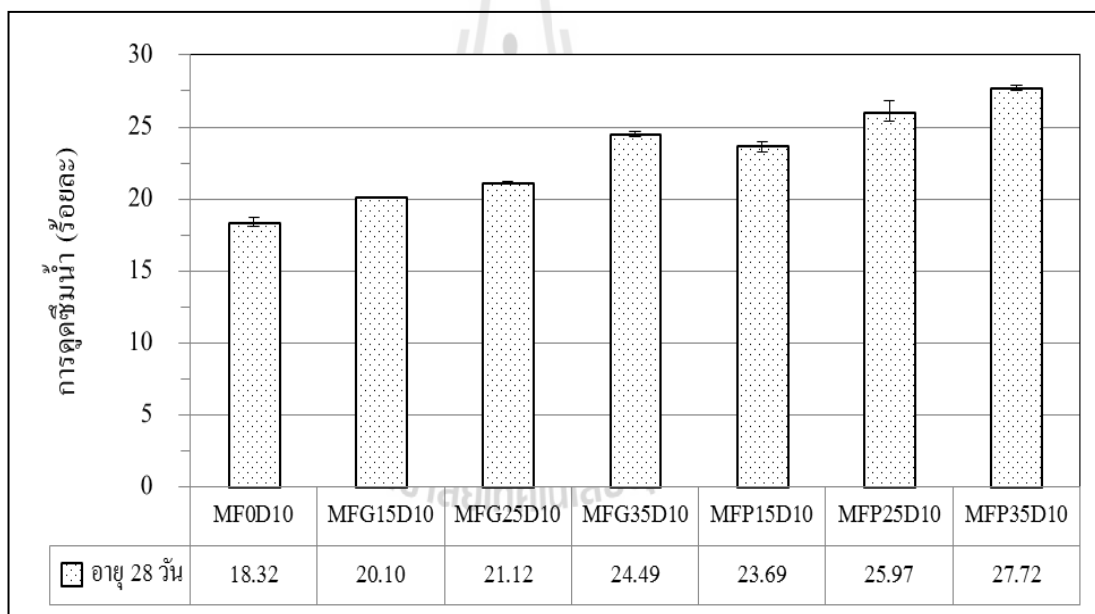
4.5 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

ตารางที่ 4.12 แสดงผลทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสอายุ 28 วัน ที่ความหนาแน่น 1,000 1,100 และ 1,300 กก./ม.³ ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อร้อยละการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.12 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

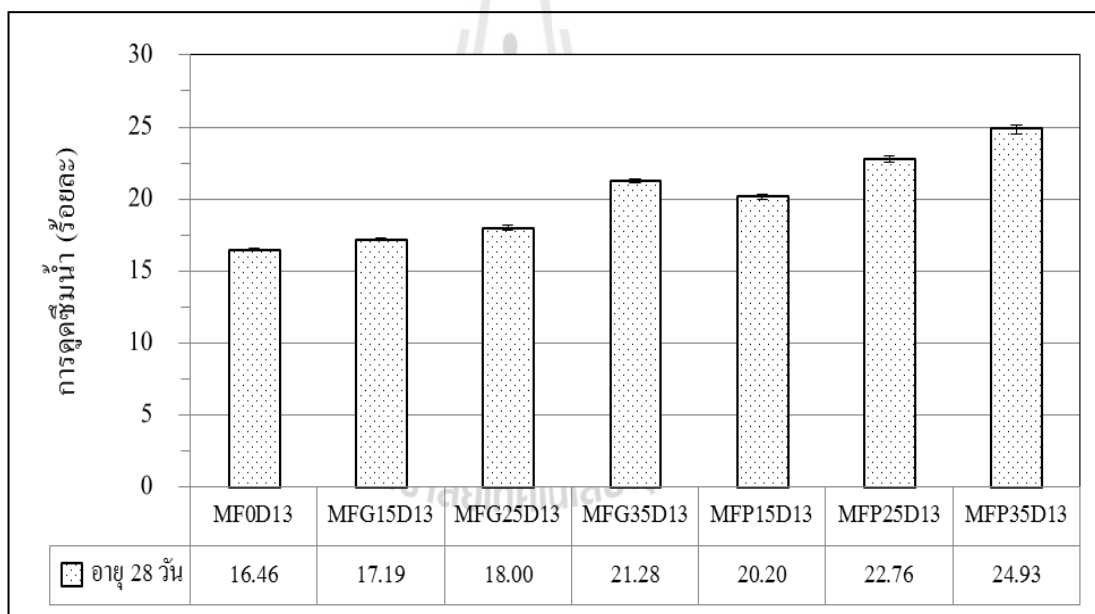
ชั้นทดสอบ	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย
MF0D10	18.14	18.11	18.70	18.32
MFG15D10	20.10	20.09	20.11	20.10
MFG25D10	21.15	21.02	21.20	21.12
MFG35D10	24.35	24.69	24.44	24.49
MFP15D10	23.30	23.81	23.96	23.69
MFP25D10	25.38	25.69	26.85	25.97
MFP35D10	27.90	27.57	27.69	27.72
MF0D11	19.00	18.43	19.53	18.99
MFG25D11	21.17	21.16	20.91	21.08
MFG25FA10D11	22.50	21.92	22.84	22.42
MFP25D11	28.46	28.68	28.67	28.60
MFP25FA10D11	29.18	29.69	30.01	29.62
MF0D13	16.42	16.60	16.36	16.46
MFG15D13	17.14	17.33	17.09	17.19
MFG25D13	18.15	18.02	17.83	18.00
MFG25FA10D13	18.99	18.98	18.45	18.81
MFG35D13	24.35	24.69	24.44	21.28
MFP15D13	19.97	20.35	20.28	20.20
MFP25D13	22.55	22.96	22.77	22.76
MFP25FA10D13	24.06	24.48	24.12	24.22
MFP35D13	25.11	24.52	25.15	24.93

รูปที่ 4.24 แสดงผลทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ผสมเศษเมลามีน อายุ 28 วัน ที่ความหนาแน่น 1,000 กก./ม.³ จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 15 (MFG15D10), 25 (MFG25D10) และ 35 (MFG35D10) มีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยร้อยละเท่ากับ 20.10 21.12 และ 24.49 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ (MF0D10) ที่มีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยร้อยละเท่ากับ 18.32 การดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตมวลเบาดังกล่าวคิดเป็นร้อยละ 9.72 15.28 และ 33.68 ตามลำดับ สำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 15 (MFP15D10), 25 (MFP25D10) และ 35 (MFP35D10) มีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยร้อยละเท่ากับ 23.69 25.97 และ 27.72 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติเช่นเดียวกัน การดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตมวลเบาดังกล่าวคิดเป็นร้อยละ 29.31 41.57 และ 51.31 ตามลำดับ



รูปที่ 4.24 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ผสมเศษเมลามีน
ความหนาแน่น 1,000 กก./ม.³

ผังรูปที่ 4.25 แสดงผลทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน อายุ 28 วัน ความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³ จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษ เม็ดเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 15 (MFG15D13), 25 (MFG25D13) และ 35 (MFG35D13) มีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยร้อยละเท่ากับ 17.19 18.00 และ 21.28 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตมวลเบา ปกติ (MF0D13) ที่มีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยร้อยละเท่ากับ 16.46 การดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีต มวลเบาดังกล่าวคิดเป็นร้อยละ 4.43 9.36 และ 29.28 ตามลำดับ สำหรับคอนกรีตมวลเบาผสม เศษเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 15 (MFP15D13), 25 (MFP25D13) และ 35 (MFP35D13) มีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยร้อยละเท่ากับ 20.20 22.76 และ 24.93 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูง กว่าและคอนกรีตมวลเบาปกติเช่นเดียวกัน การดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตมวลเบาดังกล่าวคิด เป็นร้อยละ 22.72 38.27 และ 51.46 ตามลำดับ



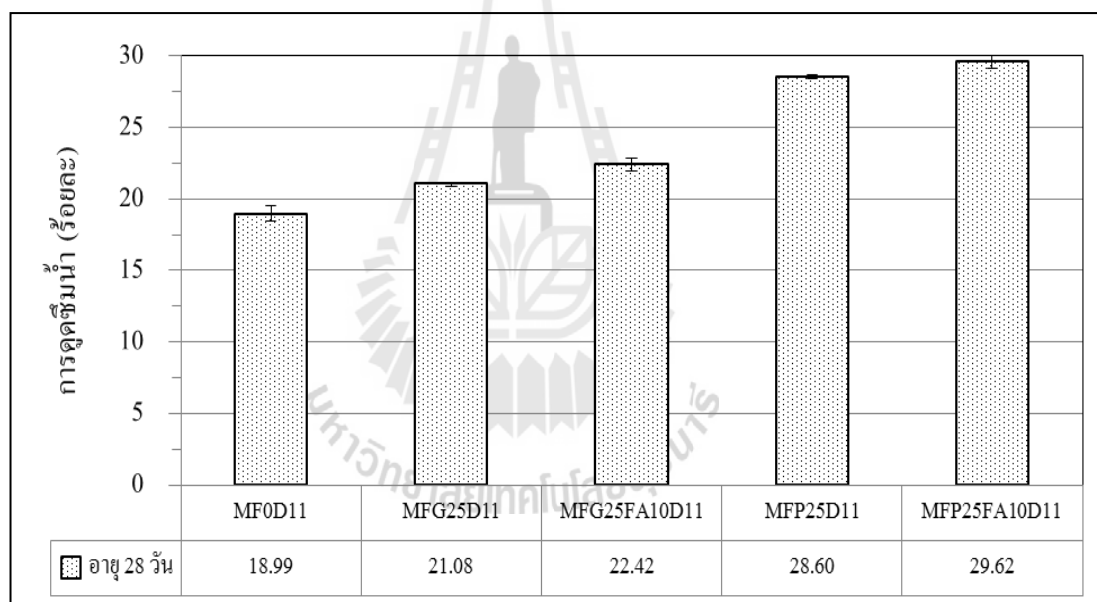
รูปที่ 4.25 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน
ความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³

จากผลทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเศษเมลามีนอายุ 28 วัน ความหนาแน่น 1,000 และ 1,300 กก./ม.³ (รูปที่ 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ) พบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีน ส่งผลให้การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนเพิ่มมากขึ้น การดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตมวลเบาเนื่องจากเศษเมลามีนมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าทราย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเศษฝุ่นเมลามีนที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากยิ่งขึ้นทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย รวมทั้งความหนาแน่นที่ลดลงของคอนกรีตมวลเบายังทำให้การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นแปรผกผันกับความพรุนของคอนกรีตมวลเบา

สำหรับการแทนที่ทรายด้วยเศษเม็ดเมลามีนร้อยละ 15 และ 25 ที่ความหนาแน่น 1,000 และ 1,300 กก./ม.³ มีค่าการดูดซึมน้ำผ่านเกณฑ์อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกมวลเบามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศมาตรฐานเลขที่ มอก.2601-2556 สำหรับคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 901-1,000 (C10) และ 1,201-1,400 (C14) ที่อัตราการดูดซึมน้ำไม่มากกว่าร้อยละ 23 และ 20 ตามลำดับ

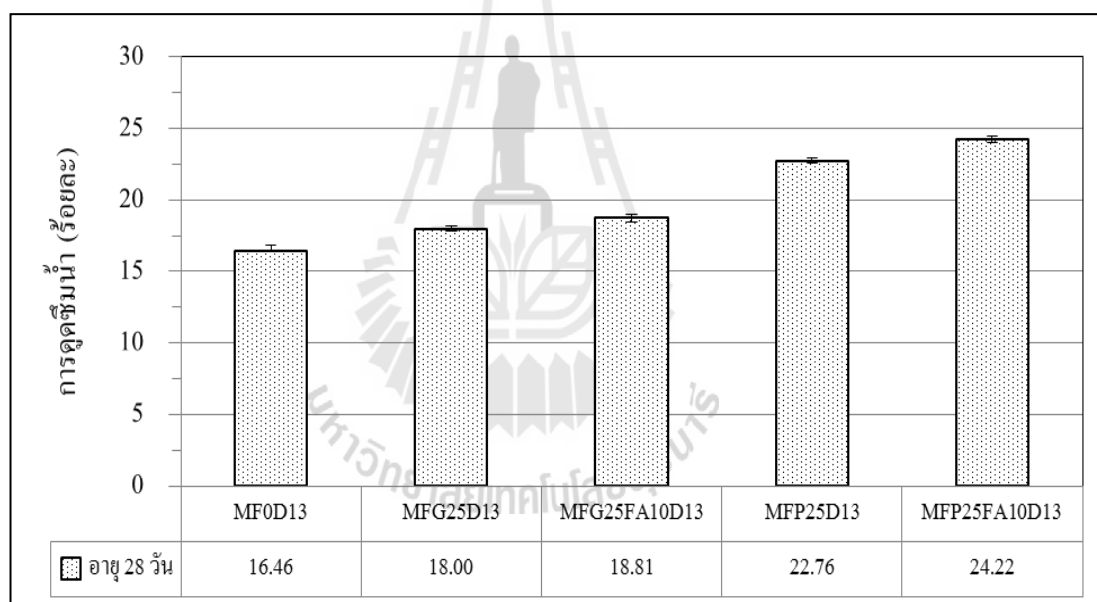
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเศษเมลามีนที่ความหนาแน่น 1,000 และ 1,300 กก./ม.³ ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ผู้วิจัยพบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนร้อยละ 25 แสดงกำลังรับแรงอัดสูงสุด อีกทั้งประกอบกับการแทนที่ทรายด้วยเศษเม็ดเมลามีนร้อยละ 25 ของคอนกรีตมวลเบา มีค่าการดูดซึมน้ำผ่านเกณฑ์ดังที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นในขั้นต่อไป ผู้วิจัยจึงทำการทดลองผสมเถ้าลอยโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา 1,100 และ 1,300 กก./ม.³ เพื่อศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยที่มีผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาให้ลดลงได้หรือไม่ ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนอายุ 28 วัน ความหนาแน่น 1,100 กก./ม.³ แสดงดังรูปที่ 4.26 พบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีน ในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 (MFG25D11) และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 (MFG25FA10D11) มีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยร้อยละเท่ากับ 21.18 และ 22.42 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่า คอนกรีตมวลเบาปกติ (MF0D13) ที่มีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยร้อยละเท่ากับ 18.99 การดูดซึมน้ำ ที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตมวลเบาดังกล่าวคิดเป็นร้อยละ 11.01 และ 18.06 ตามลำดับ สำหรับคอนกรีต มวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 (MFP25D11) และการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 (MFP25FA10D11) มีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยร้อยละเท่ากับ 28.60 และ 29.62 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติเช่นเดียวกัน การดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น ของคอนกรีตมวลเบาดังกล่าวคิดเป็นร้อยละ 50.61 และ 55.98 ตามลำดับ



รูปที่ 4.26 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน
ความหนาแน่น 1,100 กก./ม.³

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนอายุ 28 วัน ความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³ แสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีน ในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 (MFG25D13) และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 (MFG25FA10D13) มีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยร้อยละเท่ากับ 18.00 และ 18.81 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่า คอนกรีตมวลเบาปกติ (MF0D13) ที่มีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยร้อยละเท่ากับ 16.46 การดูดซึมน้ำ ที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตมวลเบาดังกล่าวคิดเป็นร้อยละ 9.36 และ 14.28 ตามลำดับ สำหรับคอนกรีต มวลเบาผสมฝุ่นเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 (MFP25D11) และการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 (MFP25FA10D11) มีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยร้อยละเท่ากับ 22.76 และ 24.22 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าและคอนกรีตมวลเบาปกติเช่นเดียวกัน การดูดซึมน้ำ ที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตมวลเบาดังกล่าวคิดเป็นร้อยละ 38.27 และ 47.14 ตามลำดับ



รูปที่ 4.27 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน
ความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนอายุ 28 วัน ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 กก./ม.³ แสดงดังรูปที่ 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ส่งผลให้การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ ถึงแม้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยจะทำให้การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้น แต่ก็ไม่ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเม็ดเมลามีนร้อยละ 25 เกินเกณฑ์อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกมวลเบามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มาตรฐานเลขที่ มอก.2601-2556 สำหรับคอนกรีตมวลเบา ที่ความหนาแน่น 1,001-1,200 (C12) และ 1,201-1,400 (C14) ที่อัตราการดูดซึมน้ำไม่มากกว่าร้อยละ 23 และ 20 ตามลำดับ

4.6 ผลวิเคราะห์การดูดซึมน้ำของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

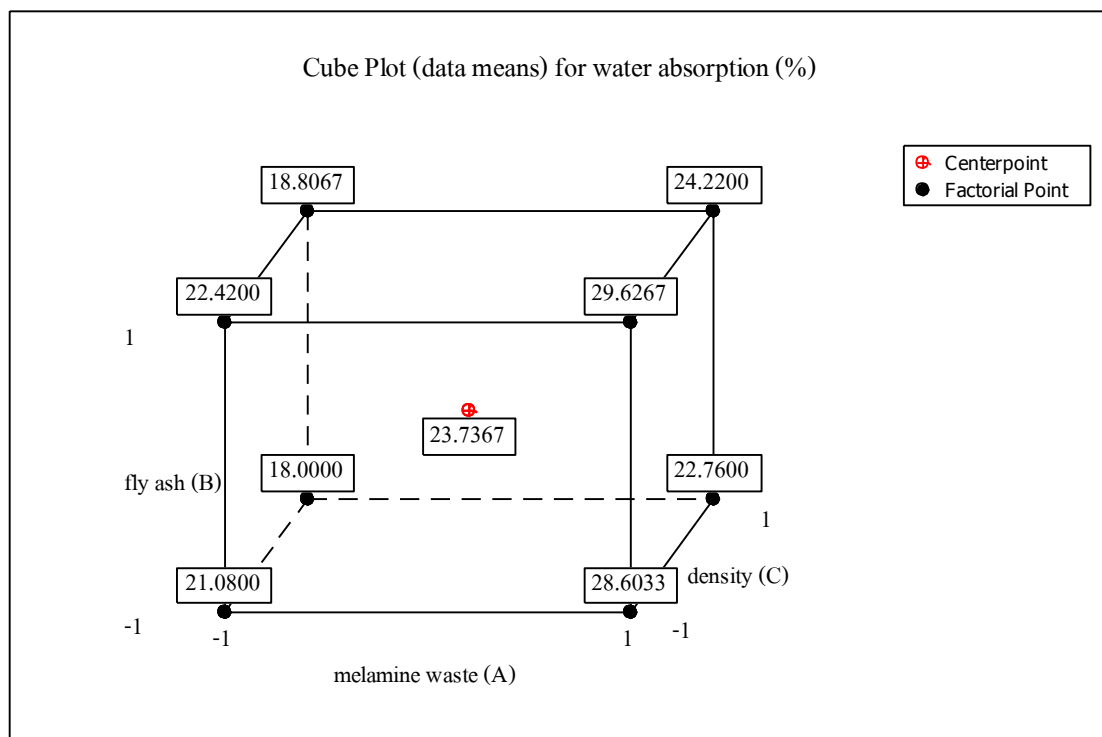
การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลของผลทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ ที่อายุ 28 วัน ซึ่งได้ออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเหมือนกับผลวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดซึ่งได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ประกอบด้วย 3 ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย การทดลองซ้ำที่ระดับปัจจัยต่าง ๆ เป็นจำนวน 3 ซ้ำ โดยมีผลตอบสนองคือค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาและมีการเพิ่มจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ ที่มีการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ

และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย ของการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา

รหัสผสม	ระดับของปัจจัย			การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)			
	เศษเมลามีน	เถ้าลอย	ความหนาแน่น	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
MFG25D11	-1	-1	-1	21.17	21.16	20.91	21.08
MFP25D11	1	-1	-1	28.46	28.68	28.67	28.60
MFG25FA10D11	-1	1	-1	22.50	21.92	22.84	22.42
MFP25FA10D11	1	1	-1	29.18	29.69	30.01	29.62
MFG25D13	-1	-1	1	18.15	18.02	17.83	18.00
MFP25D13	1	-1	1	22.55	22.96	22.77	22.76
MFG25FA10D13	-1	1	1	18.99	18.98	18.45	18.81
MFP25FA10D13	1	1	1	24.06	24.48	24.12	24.22
MFGP25FA5D12	0	0	0	23.98	23.72	23.51	23.74

จากค่าเฉลี่ยการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาในแต่ละทริทเมนต์คอมบินชันของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับและจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทริทเมนต์คอมบินชัน ในแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย แสดงดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ทริทเมนต์คอมบินชันของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา

4.6.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแผนการทดลองการดูดซึมน้ำ

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง เป็นการตรวจสอบความเหมาะสม และความเพียงพอของรูปแบบทางสถิติของแผนการทดลองของการดูดซึมน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.29

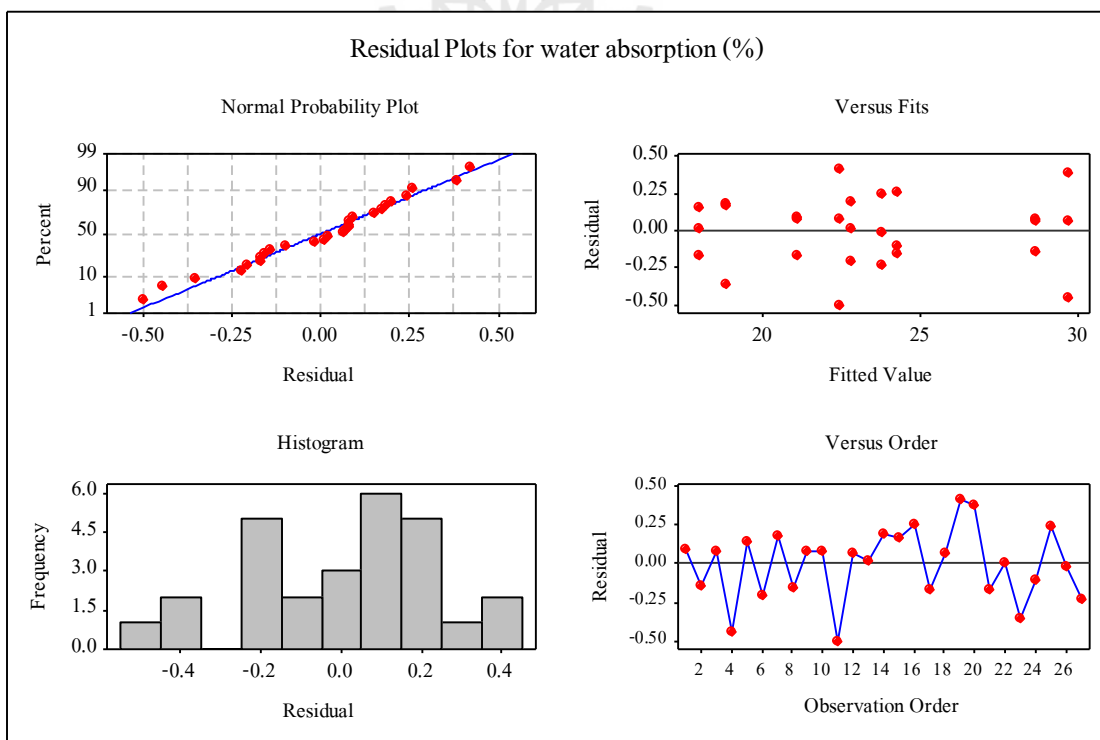
1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (normal distribution) ของส่วนตกค้าง (residuals) แสดงดังรูปที่ 4.29 (บนซ้าย) พบว่า ค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

2) การตรวจสอบความเสถียรภาพของ σ^2 (variance stability) แสดงดังรูปที่ 4.29 (บนขวา) พบว่า σ^2 ของส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง และไม่พบว่ามีรูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างใด ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวน

3) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (independent) ของส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 4.29 (ล่างขวา) พบว่า การกระจายตัวของส่วนตกค้างมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

4) การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 4.29 (ล่างซ้าย) พบว่า ส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัยที่กระจายในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้าง มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับศูนย์

จากการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่า ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำมีความเหมาะสมและเพียงพอกับรูปแบบทางสถิติของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 แฟกทอเรียล สามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนในขั้นต่อไปได้



รูปที่ 4.29 การตรวจสอบความถูกต้องของแผนการทดลองการดูดซึมน้ำ

4.6.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 แฟกทอเรียล และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย ในการทดสอบการดูดซึมน้ำ เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ($\alpha=0.05$) ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 4.14 และ 4.15

ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล

และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา

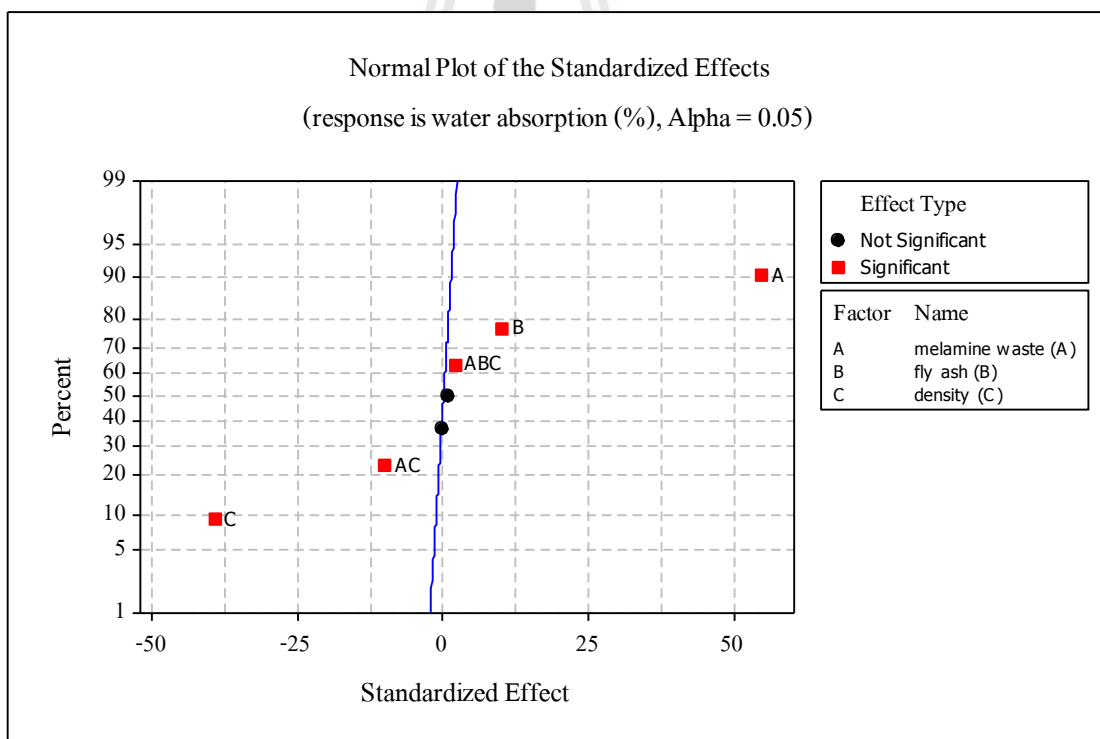
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
ค่าคงที่		23.190	0.05690	407.58	0.000
รูปแบบเศษ (A)	6.226	3.113	0.05690	54.71	0.000
เนื้อล้อย (B)	1.157	0.579	0.05690	10.17	0.000
ความหนาแน่น (C)	-4.486	-2.243	0.05690	-39.42	0.000
AB	0.084	0.042	0.05690	0.74	0.469
AC	-1.139	-0.570	0.05690	-10.01	0.000
BC	-0.024	-0.012	0.05690	-0.21	0.834
ABC	0.242	0.121	0.05690	2.13	0.047
S = 0.278734		R-Sq = 99.62%		R-Sq(adj) = 99.46%	

ตารางที่ 4.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล

และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา

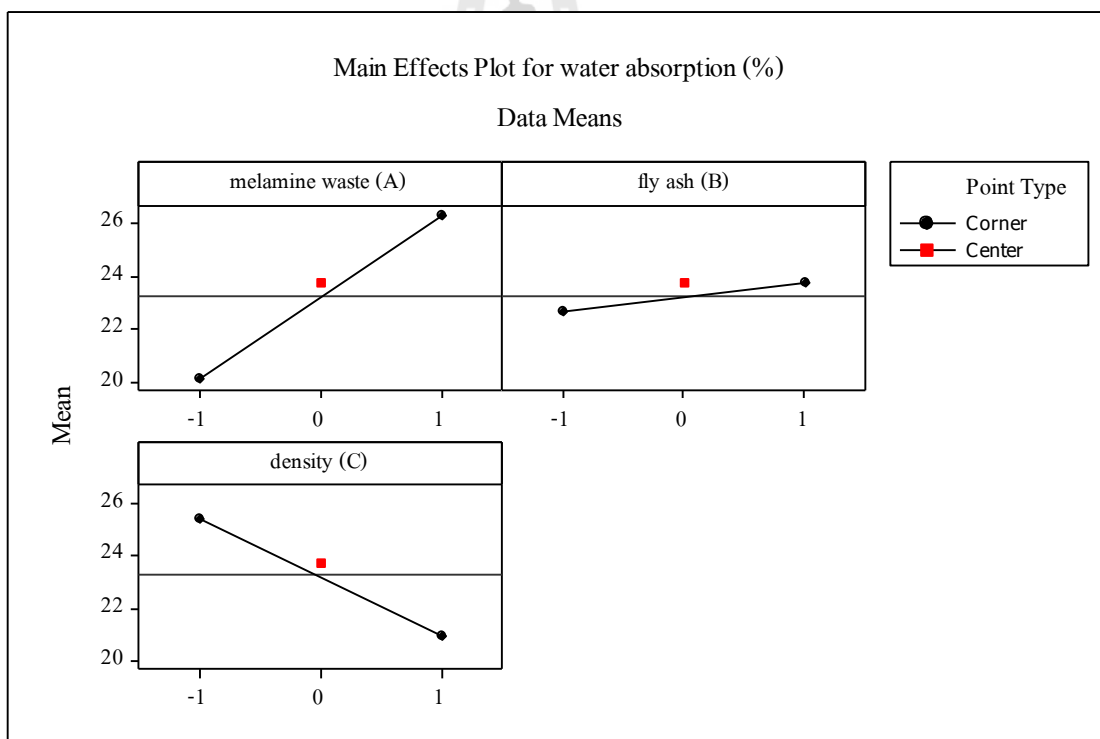
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	361.341	361.341	120.447	1550.30	0.000
2-Way Interactions	3	7.832	7.832	2.611	33.60	0.000
3-Way Interactions	1	0.353	0.353	0.353	4.54	0.047
Curvature	1	0.798	0.798	0.798	10.27	0.005
Residual Error	18	1.398	1.398	0.078		
Pure Error	18	1.398	1.398	0.078		
Total	26	371.723				

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 4.15 พบว่า อิทธิพลเนื่องจากปัจจัยหลักทั้งสาม ประกอบด้วย เศษเมลามีน (A), เถ้าลอย (B), และความหนาแน่น (C) และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย ประกอบด้วย เศษเมลามีนกับความหนาแน่น (AC) และเศษเมลามีนเถ้าลอยกับความหนาแน่น (ABC) มีอิทธิพลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน อย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} < 0.05$) ในขณะที่อิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัยของ เศษเมลามีนกับเถ้าลอย (AB) และเถ้าลอยกับความหนาแน่น (BC) ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} > 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.30 ที่แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยหลักทั้งสาม (A, B และ C) และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (AC และ ABC) มีอิทธิพลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วันอย่างมีนัยสำคัญ โดยสังเกตได้จากจุดของปัจจัย A, B, C, AC และ ABC มีแนวโน้มไม่ได้อยู่บนเส้นตรงของแผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติของตัวประมาณอิทธิพลใด ๆ



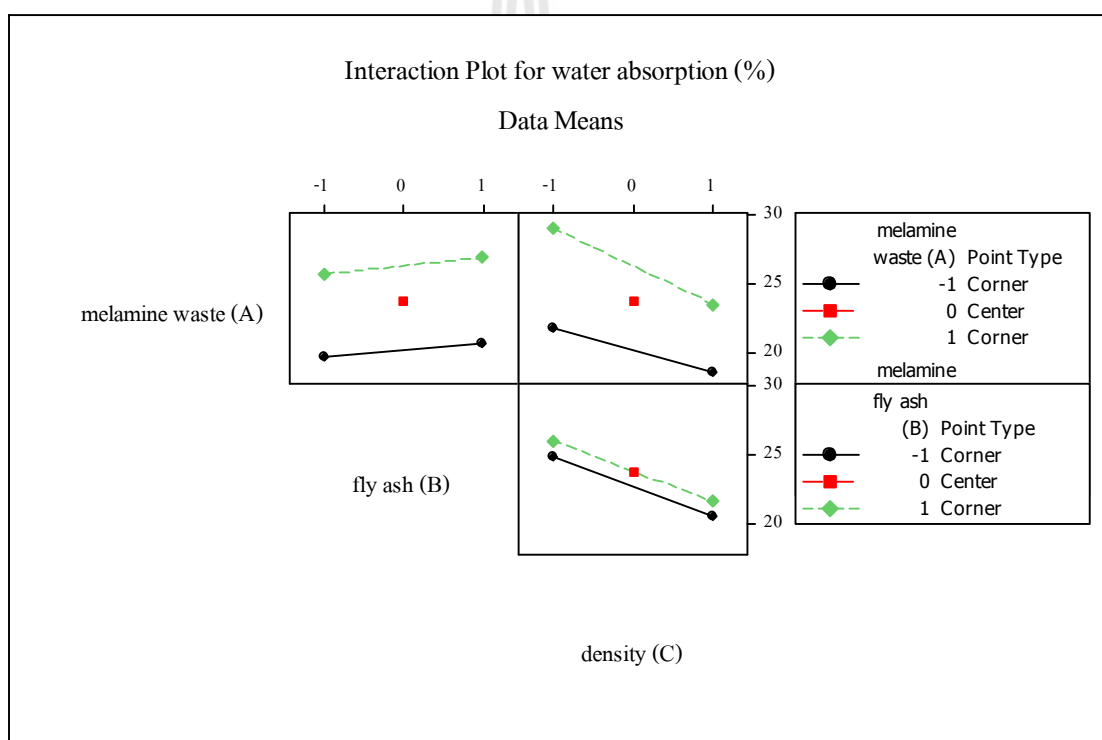
รูปที่ 4.30 ความน่าจะเป็นแบบปกติของตัวประมาณของอิทธิพลทั้งหมดของการดูดซึมน้ำ

จากการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (main effect plot) ทั้งสามปัจจัย ประกอบด้วย เศษเมลามีน (A), เถ้าลอย (B), และความหนาแน่น (C) ที่มีอิทธิพลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน แสดงดังรูปที่ 4.31 พบว่า ความชันของปัจจัยหลัก เศษเมลามีน (A) และ เถ้าลอย (B) มีค่าเป็นบวกหมายถึง การเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่งหน่วยเป็นผลทำให้ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองเพิ่มขึ้น กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอิทธิพล เศษเมลามีน (A) และ เถ้าลอย (B) มีผลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ความชันของปัจจัยหลัก ความหนาแน่น (C) มีค่าเป็นลบ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่งหน่วยเป็นผลทำให้ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองลดลง กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอิทธิพล ความหนาแน่น (C) มีผลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน ลดลง และรูปแบบสมการถดถอยของค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของตำแหน่งจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย 3 ตัว มีแนวโน้มไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งดูได้จากค่า p-value ของ curvature (ตารางที่ 4.16) ที่ต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ ($\alpha=0.05$)



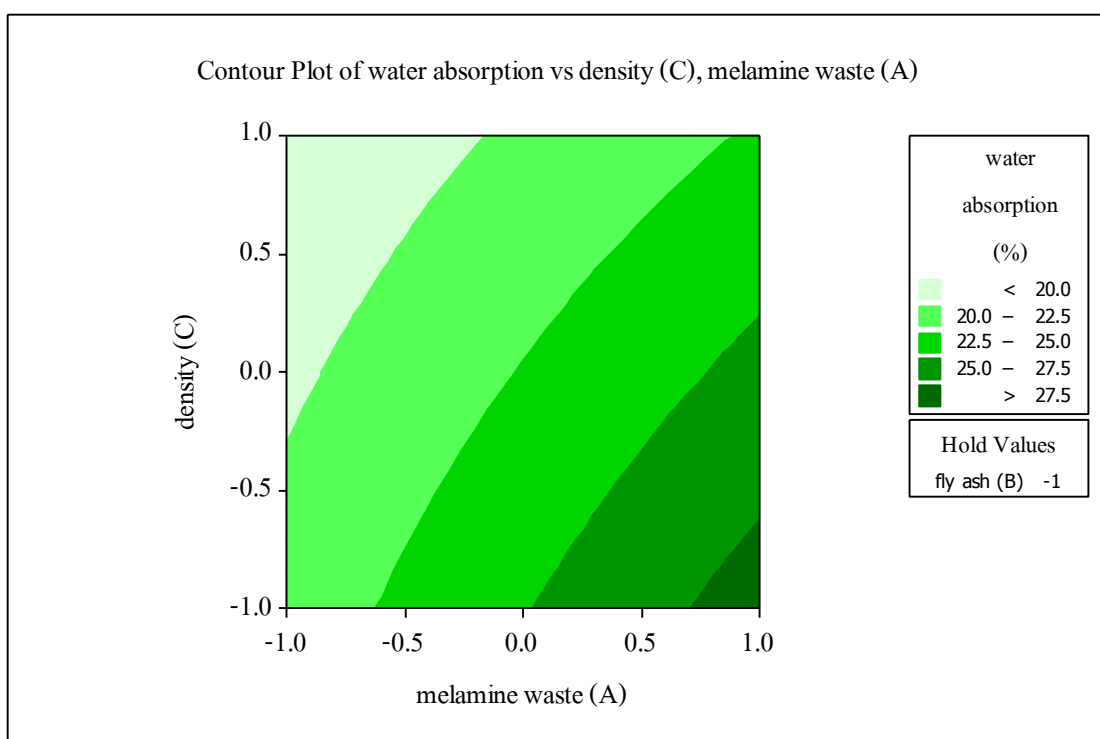
รูปที่ 4.31 การประมาณอิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลอง 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา

จากการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย (interaction plot) แสดงดังรูปที่ 4.32 พบว่า ความชันของอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย AB มีค่าเป็นบวกหมายถึง การเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่งหน่วยเป็นผลทำให้ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ความชันของอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย AC และ BC มีค่าเป็นลบ หมายถึงการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่งหน่วยเป็นผลทำให้ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองลดลง อีกทั้ง การเพิ่มขึ้นของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยเศษเมลามีนกับความหนาแน่น (AC) มีผลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วันลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ดูได้จากความชันที่แตกต่างกัน ขณะที่อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยเศษเมลามีนกับเถ้าลอย (AB) และ เถ้าลอยกับความหนาแน่น (BC) ไม่มีผลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วันอย่างมีนัยสำคัญ ดูได้จากความชันที่ใกล้เคียงกัน

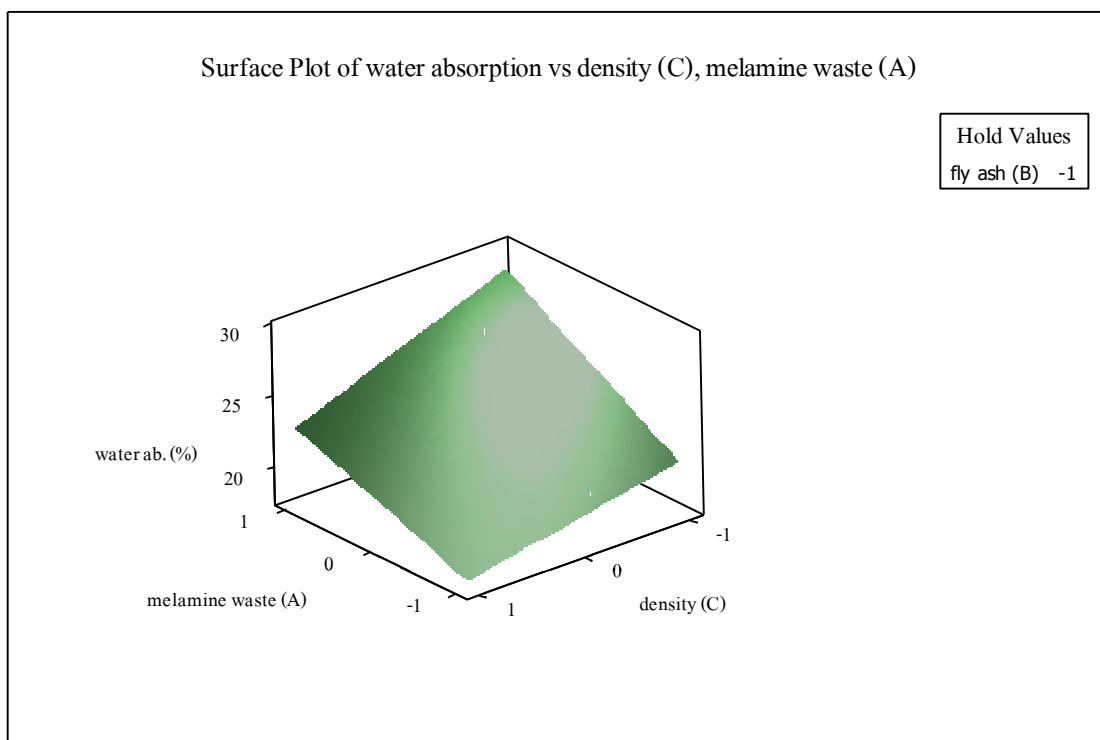


รูปที่ 4.32 การประมาณอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของแผนการทดลอง 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา

การประมวลผลในลักษณะของวิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (steepest ascent) สามารถแสดงผลลัพธ์ออกมาเป็นแผนภาพโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองระหว่างปัจจัยเศษเมลามีน (A) และความหนาแน่น (C) แสดงดังรูปที่ 4.33 และ 4.34 พบว่า การเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยเศษเมลามีน (จากเศษเม็ดเป็นเศษฝุ่นเมลามีน) และ การเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยความหนาแน่น (จาก 1,300 เป็น 1,100 กก./ม.³) ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.33 โครงร่างระหว่าง ปัจจัยเศษเมลามีน (A) และความหนาแน่น (C)



รูปที่ 4.34 พื้นผิวตอบสนองระหว่าง ปัจจัยเศษเมลามีน (A) และความหนาแน่น (C)

4.6.3 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยของการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา

จากการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยของการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบ 2^3 แฟกทอเรียล พบว่า รูปแบบสมการถดถอยของค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของตำแหน่งจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย 3 ข้อ มีแนวโน้มไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งดูได้จาก ค่า p-value ของ curvature (ตารางที่ 4.15) ที่ต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ ($\alpha=0.05$) อีกทั้งแบบจำลองเพื่อแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ โดยการพิจารณาอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน สามารถเขียนแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นได้ดังนี้

$$Y_{WA} = 23.19 + 3.11A + 0.58B - 2.27C - 0.57AC + 0.12ABC \quad (4.3)$$

เมื่อพิจารณาค่า R^2 (adj) แสดงดังตาราง 4.14 พบว่า ระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม มีความสัมพันธ์กันในระดับดีมาก โดยมีค่าเท่ากับ 99.46%

4.6.4 การกำหนดระดับของปัจจัยเพื่อทำนายค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา

ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดระดับของปัจจัยต่าง ๆ จำนวน 4 การออกแบบสัดส่วนผสม ประกอบด้วย ระดับของปัจจัยเศษเมลามีน ถั่วลอย และความหนาแน่นเท่ากับ (0, -1, -1) (0, 1, -1) (0, -1, 1) และ (0, 1, 1) ตามลำดับ โดยมีปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยแสดงดังตารางที่ 4.16 ซึ่งผลทำนายค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน สามารถหาได้จากการแทนระดับของแต่ละปัจจัยลงในแบบจำลองการถดถอย (สมการที่ 4.3) โดยผลทำนายค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 24.84 26.02 20.38 และ 21.51 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.16 การกำหนดระดับของปัจจัยเพื่อทำนายค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา

รหัสผสม	ระดับของปัจจัย			การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
	เศษเมลามีน	ถั่วลอย	ความหนาแน่น	ทำนาย
MFGP25D11	0	-1	-1	24.84
MFGP25FA10D11	0	1	-1	26.02
MFGP25D13	0	-1	1	20.38
MFGP25FA10D13	0	1	1	21.51

4.6.5 การทดสอบยืนยันผลการทำนายค่าการดูดซึมน้ำ

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน เพื่อเปรียบเทียบผลทำนายจากสมการแบบจำลองการถดถอย ของปัจจัยเศษเมลามีน ถั่วลอย และความหนาแน่นเท่ากับ (0, -1, -1) (0, 1, -1) (0, -1, 1) และ (0, 1, 1) จำนวน 3 ซ้ำ ของแต่ละการออกแบบสัดส่วนผสม ซึ่งได้ค่าเฉลี่ยการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 24.15 25.09 22.71 และ 23.47 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.17

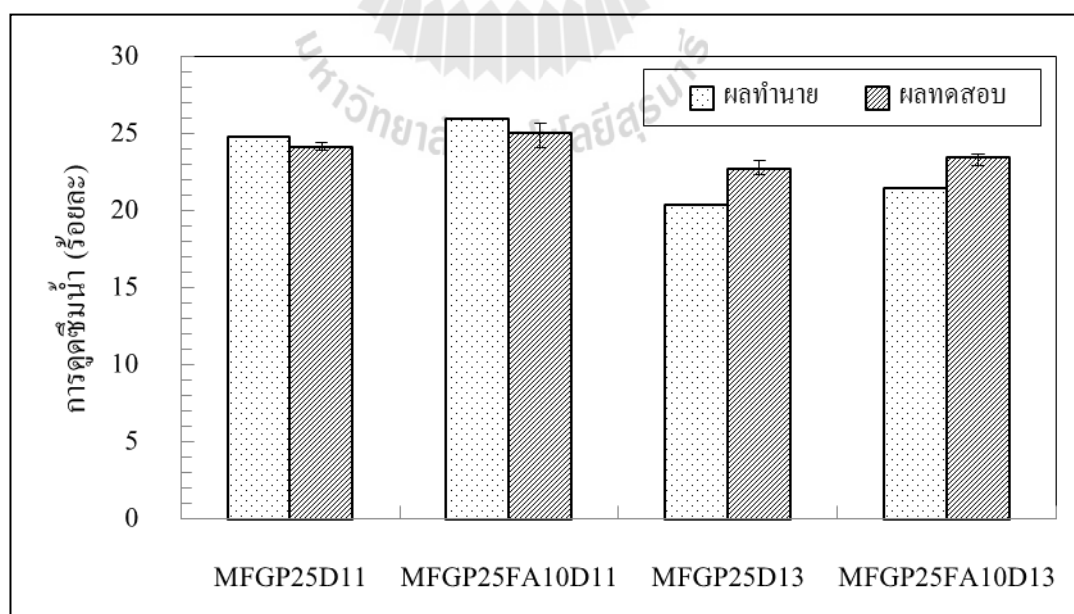
ตารางที่ 4.17 การกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง

รหัสผสม	ระดับของปัจจัย			ค่าการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)			
	เศษเมลามีน	ถั่วลอย	ความหนาแน่น	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
MFGP25D11	0	-1	-1	23.94	24.47	24.05	24.15
MFGP25FA10D11	0	1	-1	25.43	25.72	24.13	25.09
MFGP25D13	0	-1	1	22.35	22.50	23.28	22.71
MFGP25FA10D13	0	1	1	23.73	22.96	23.73	23.47

ตารางที่ 4.18 แสดงผลเปรียบเทียบค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน ระหว่างผลทำนายจากแบบจำลองการถดถอยและผลการทดสอบจริง ที่ระดับของปัจจัยเศษเมลามีน ใถ้าลอย และความหนาแน่น (0, -1, -1) (0, 1, -1) (0, -1, 1) และ (0, 1, 1) ตามลำดับ เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือและความคลาดเคลื่อนของสมการแบบจำลองการถดถอย จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน ที่ได้จากผลการทำนายและผลการทดสอบจริง มีความใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.35 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 6.29

ตารางที่ 4.18 ผลเปรียบเทียบค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน
ของผลทำนายและผลการทดสอบจริง

ลำดับ ที่	รหัสผสม	ระดับของปัจจัย			การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)		ความคลาด เคลื่อน (ร้อยละ)
		เศษ เมลามีน	ใถ้าลอย	ความ หนาแน่น	ทำนาย	ทดสอบ	
1	MFGP25D11	0	-1	-1	24.84	24.15	2.86
2	MFGP25FA10D11	0	1	-1	26.02	25.09	3.71
3	MFGP25D13	0	-1	1	20.38	22.71	10.26
4	MFGP25FA10D13	0	1	1	21.51	23.47	8.35



รูปที่ 4.35 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน
ของผลทำนายและผลการทดสอบจริง

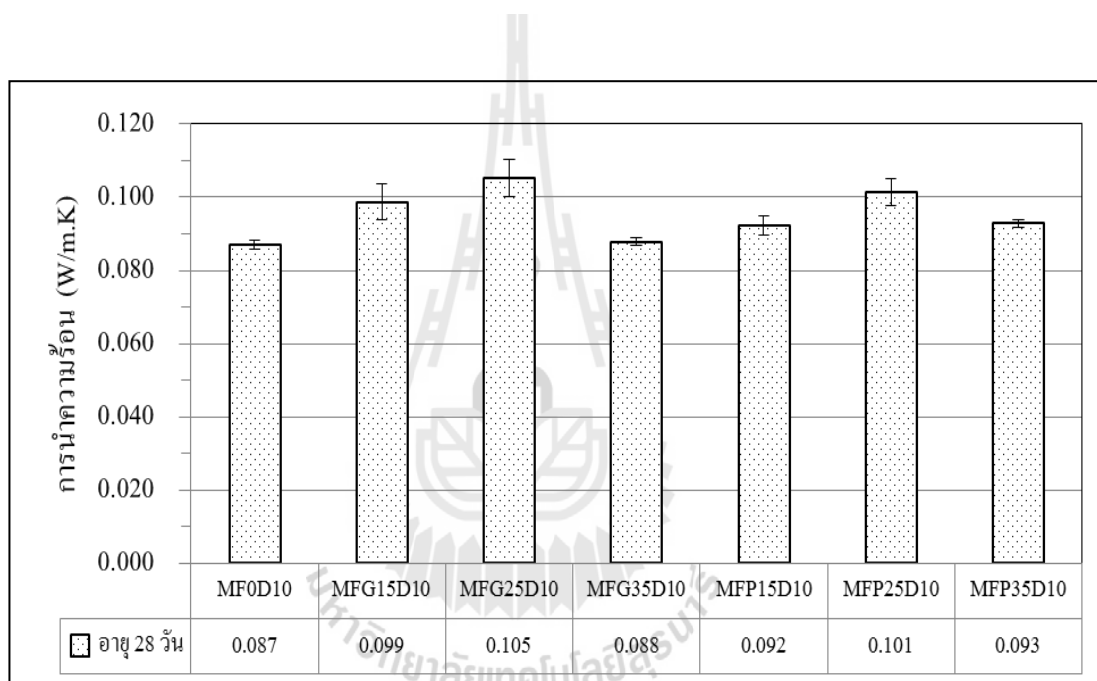
4.7 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

ตารางที่ 4.19 แสดงผลทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์อายุ 28 วัน ความหนาแน่น 1,000 1,100 และ 1,300 กก./ม.³ ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า ค่าการนำความร้อนคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ กล่าวคือ การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนมีผลต่อการนำความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.19 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

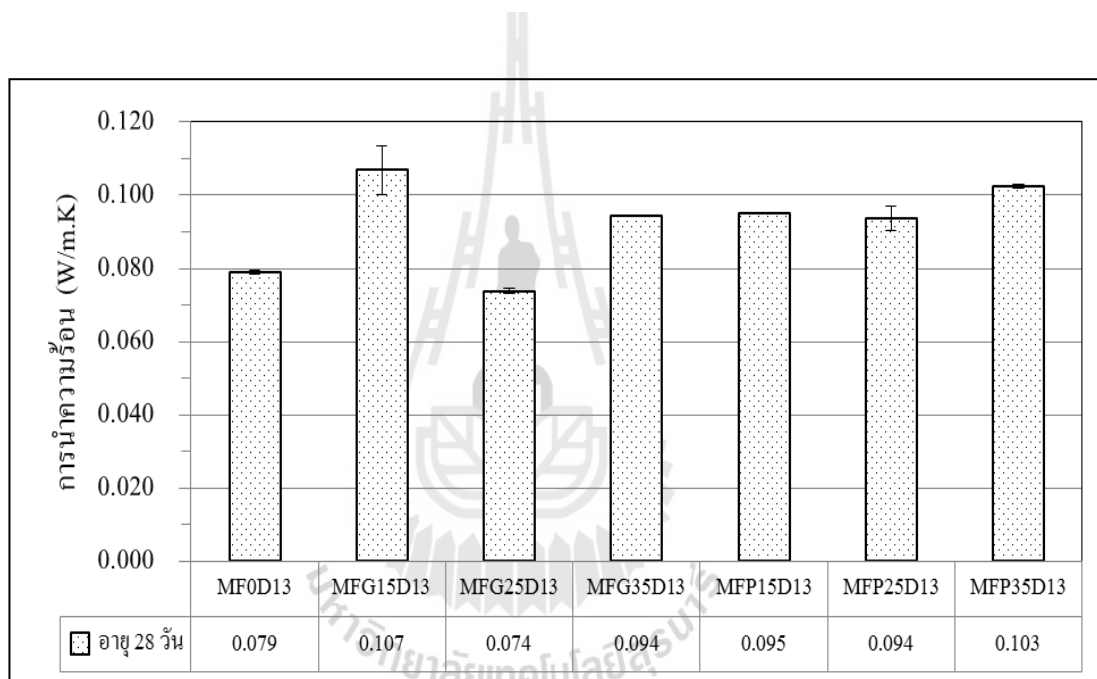
ชั้นทดสอบ	การนำความร้อน (W/m.K)		
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ค่าเฉลี่ย
MF0D10	0.086	0.088	0.087
MFG15D10	0.104	0.094	0.099
MFG25D10	0.110	0.100	0.105
MFG35D10	0.089	0.087	0.088
MFP15D10	0.095	0.090	0.092
MFP25D10	0.098	0.105	0.101
MFP35D10	0.092	0.094	0.093
MF0D11	0.099	0.082	0.091
MFG25D11	0.097	0.084	0.090
MFG25FA10D11	0.090	0.096	0.093
MFP25D11	0.090	0.078	0.084
MFP25FA10D11	0.092	0.091	0.092
MF0D13	0.079	0.078	0.079
MFG15D13	0.114	0.100	0.107
MFG25D13	0.075	0.073	0.074
MFG25FA10D13	0.094	0.100	0.097
MFG35D13	0.094	0.094	0.094
MFP15D13	0.095	0.095	0.095
MFP25D13	0.097	0.090	0.094
MFP25FA10D13	0.098	0.095	0.096
MFP35D13	0.103	0.102	0.103

ผลการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนอายุ 28 วัน ความหนาแน่น 1,000 กก./ม.³ แสดงดังรูปที่ 4.36 จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 15 (MFG15D10), 25 (MFG25D10), และ 35 (MFG35D10) มีค่าการนำความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.099 0.105 และ 0.088 W/m.K ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ (MF0D10) เล็กน้อย ที่มีการนำความร้อนน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 0.087 W/m.K สำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 15 (MFP15D10), 25 (MFP25D10) และ 35 (MFP35D10) มีค่าการนำความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.092 0.101 และ 0.093 W/m.K ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.36 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน
ความหนาแน่น 1,000 กก./ม.³

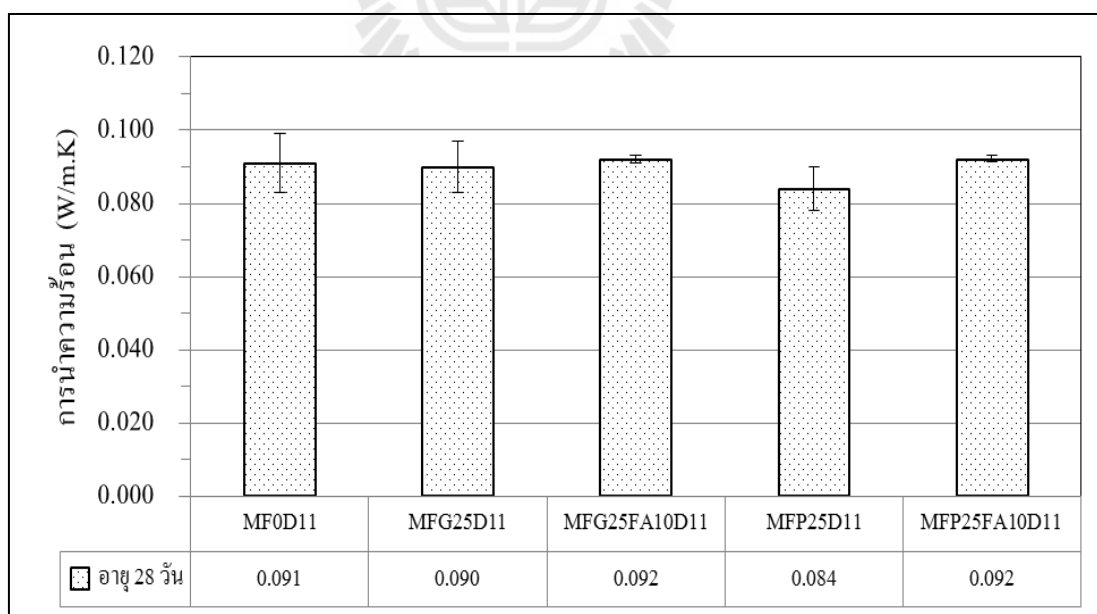
ผลการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนอายุ 28 วัน ความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³ แสดงดังรูปที่ 4.37 จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 15 (MFG15D13), 25 (MFG25D13) และ 35 (MFG35D13) มีค่าการนำความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.107 0.074 และ 0.094 W/m.K ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ (MF0D13) เล็กน้อย ที่มีค่าการนำความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.079 W/m.K สำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 15 (MFP15D13), 25 (MFP25D13), และ 35 (MFP35D13) มีการนำความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.095 0.094 และ 0.103 W/m.K ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.37 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³

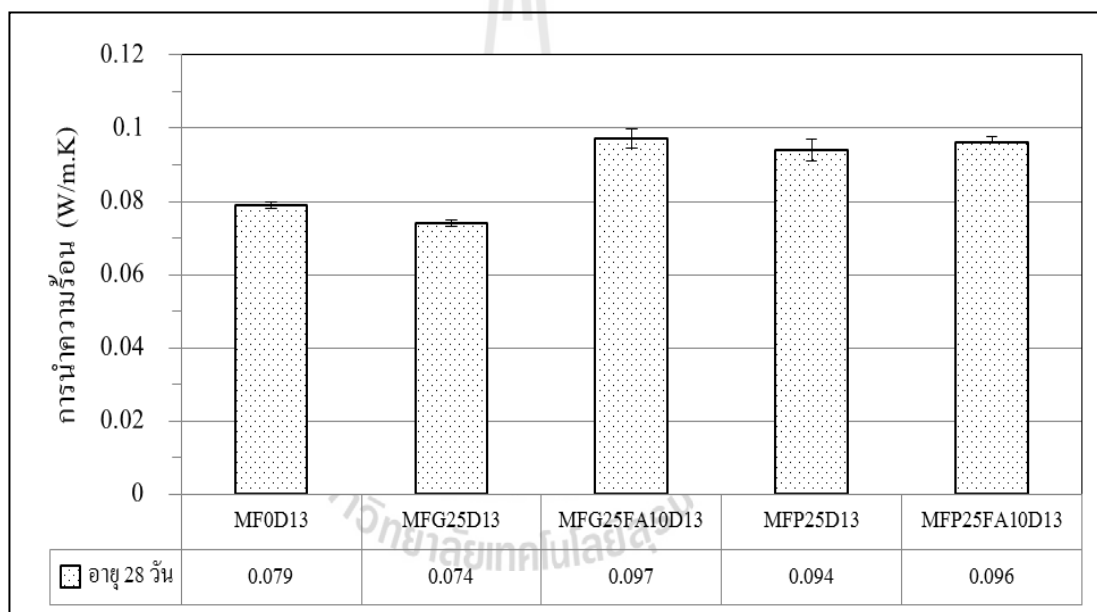
ผลการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนอายุ 28 วัน ความหนาแน่น 1,000 และ 1,300 กก./ม.³ (รูปที่ 4.36 และ 4.37 ตามลำดับ) พบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีน ส่งผลให้การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ การเพิ่มขึ้นของการนำความร้อนอาจเกิดจากขนาดรูพรุนเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีขนาดเล็กกลง นั่นคือคอนกรีตมวลเบาที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าคอนกรีตแน่นขึ้น ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนอายุ 28 วัน ความหนาแน่น 1,100 กก./ม.³ แสดงดังรูปที่ 4.38 จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 (MFG25D11) และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 (MFG25FA10D11) มีการนำความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.090 และ 0.092 W/m.K ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาปกติ (MF0D11) ที่มีค่าการนำความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.091 W/m.K สำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 (MFP25D11) และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 (MFP25FA10D11) มีการนำความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.084 และ 0.092 W/m.K ตามลำดับ ซึ่งมีการนำความร้อนที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีนและคอนกรีตมวลเบาปกติเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.38 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน ความหนาแน่น 1,100 กก./ม.³

ผลการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ผสมเศษเมลามีนอายุ 28 วัน ความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³ แสดงดังรูปที่ 4.39 จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 (MFG25D13) และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 (MFG25FA10D13) มีค่าการนำความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.074 และ 0.097 W/m.K ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ (MF0D13) เล็กน้อย ที่มีการนำความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.079 W/m.K สำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 (MFP25D13) และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 (MFP25FA10D13) มีค่าการนำความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.094 และ 0.096 W/m.K ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.39 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ผสมเศษเมลามีน ความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³

ผลการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ผสมเศษเมลามีนอายุ 28 วัน ความหนาแน่น 1,100 1,300 กก./ม.³ แสดงดังรูปที่ 4.38 และ 4.39 ตามลำดับ พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ส่งผลให้การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของคอนกรีตมวลลดลง หรือกล่าวได้ว่าคอนกรีตมวลเบาแน่นขึ้น จึงส่งผลให้การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

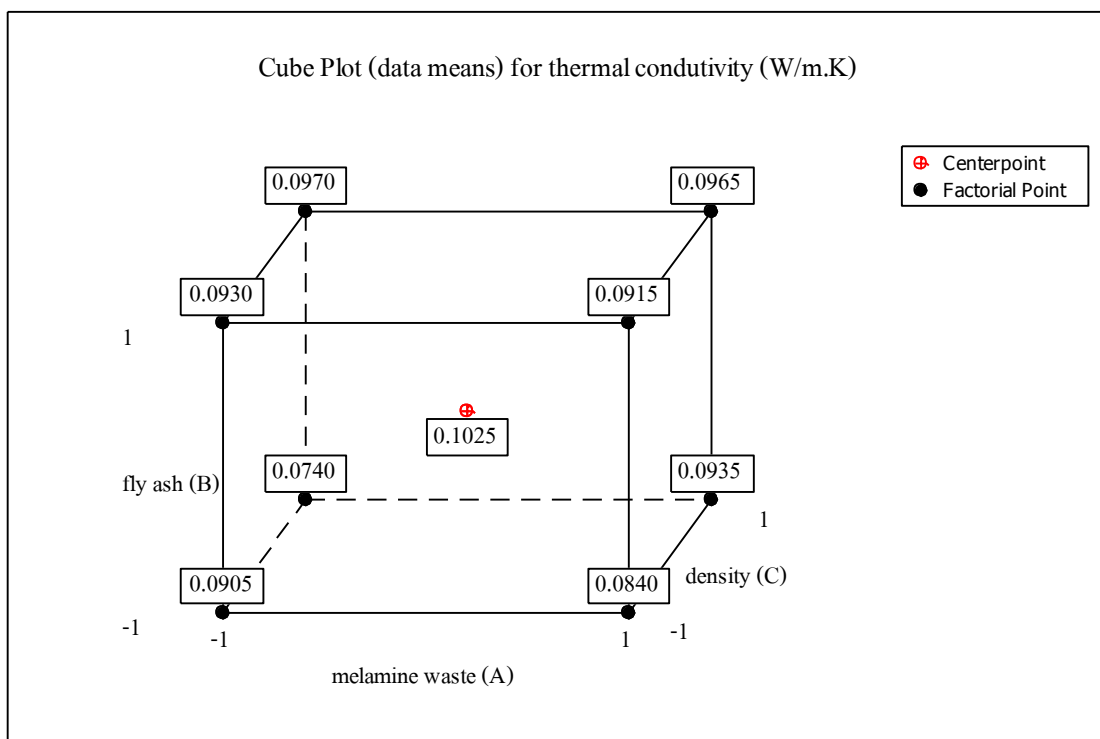
4.8 ผลวิเคราะห์การนำความร้อนของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลของผลทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ ที่อายุ 28 วัน ซึ่งได้ออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเหมือนกับผลวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ประกอบด้วย 3 ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย การทดลองซ้ำที่ระดับปัจจัยต่าง ๆ เป็นจำนวน 2 ซ้ำ โดยมีผลตอบแทนคือค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาและมีการเพิ่มจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย แสดงดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ ที่มีการทดลองซ้ำ 2 ซ้ำ และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย ของการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา

รหัสผสม	ระดับของปัจจัย			การนำความร้อน (W/m.K)		
	เมลามีน	เถ้าลอย	ความหนาแน่น	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
MFG25D11	-1	-1	-1	0.097	0.084	0.0905
MFP25D11	1	-1	-1	0.090	0.078	0.0840
MFG25FA10D11	-1	1	-1	0.090	0.096	0.0930
MFP25FA10D11	1	1	-1	0.092	0.091	0.0915
MFG25D13	-1	-1	1	0.075	0.073	0.0740
MFP25D13	1	-1	1	0.097	0.090	0.0935
MFG25FA10D13	-1	1	1	0.094	0.100	0.0970
MFP25FA10D13	1	1	1	0.098	0.095	0.0965
MFGP25FA5D12	0	0	0	0.103	0.102	0.1025

จากค่าเฉลี่ยการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาในแต่ละทริทเมนต์คอมบิเนชันของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับและจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทริทเมนต์คอมบิเนชัน ในแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล แสดงดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 ทริทเมนต์คอมบิเนชันของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา

4.8.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแผนการทดลองการนำความร้อน

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความเพียงพอของรูปแบบทางสถิติของแผนการทดลองของการนำความร้อน แสดงดังรูปที่ 4.41

1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (normal distribution) ของส่วนตกค้าง (residuals) แสดงดังรูปที่ 4.41 (บนซ้าย) พบว่า ค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

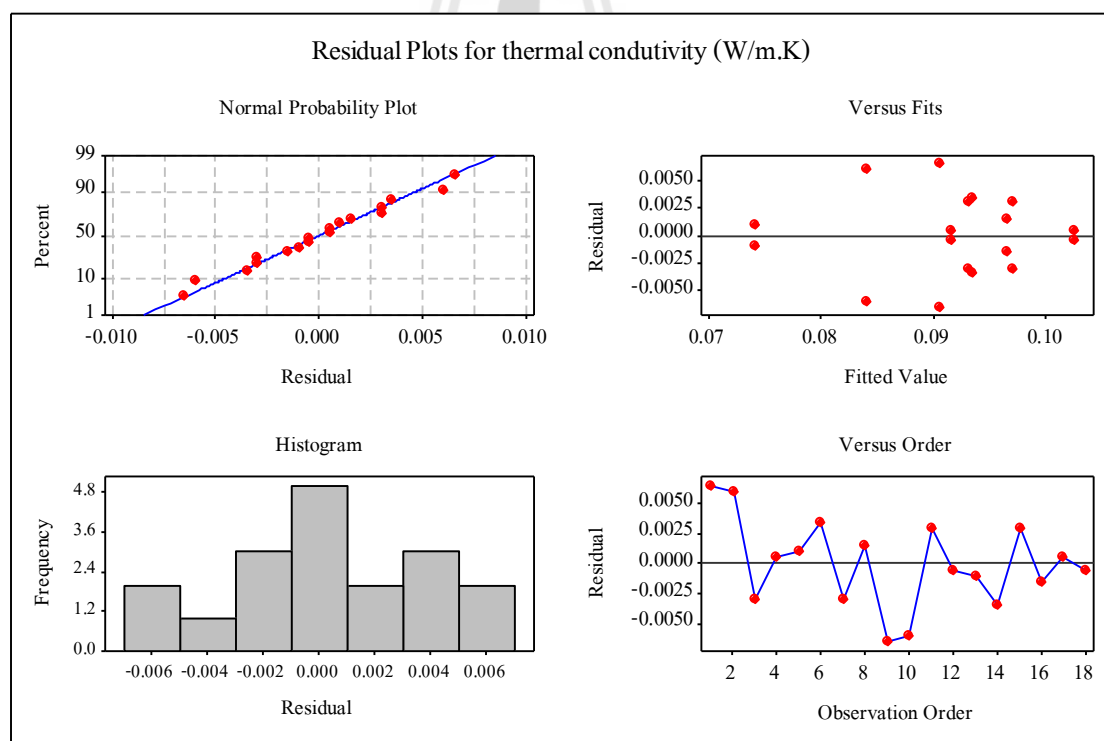
2) การตรวจสอบความเสถียรภาพของ σ^2 (variance stability) แสดงดังรูปที่ 4.41 (บนขวา) พบว่า σ^2 ของส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง และไม่พบว่ามีรูปแบบการกระจาย

ตัวของค่าส่วนตกค้างมีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างไร ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวน

3) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (independent) ของส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 4.41 (ล่างขวา) พบว่า การกระจายตัวของส่วนตกค้างมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

4) การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 4.41 (ล่างซ้าย) พบว่า ส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัยที่กระจายในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้าง มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับศูนย์

จากการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่า ผลการทดสอบการนำความร้อนมีความเหมาะสมกับรูปแบบทางสถิติของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 แฟกทอเรียลสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนในขั้นต่อไปได้



รูปที่ 4.41 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองของนำความร้อน

4.8.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 แฟกทอเรียล และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย ในการทดสอบการนำความร้อนเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ($\alpha=0.05$) ผลวิเคราะห์ความแปรปรวน แสดงดังตารางที่ 4.21 และ 4.22

ตารางที่ 4.21 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล

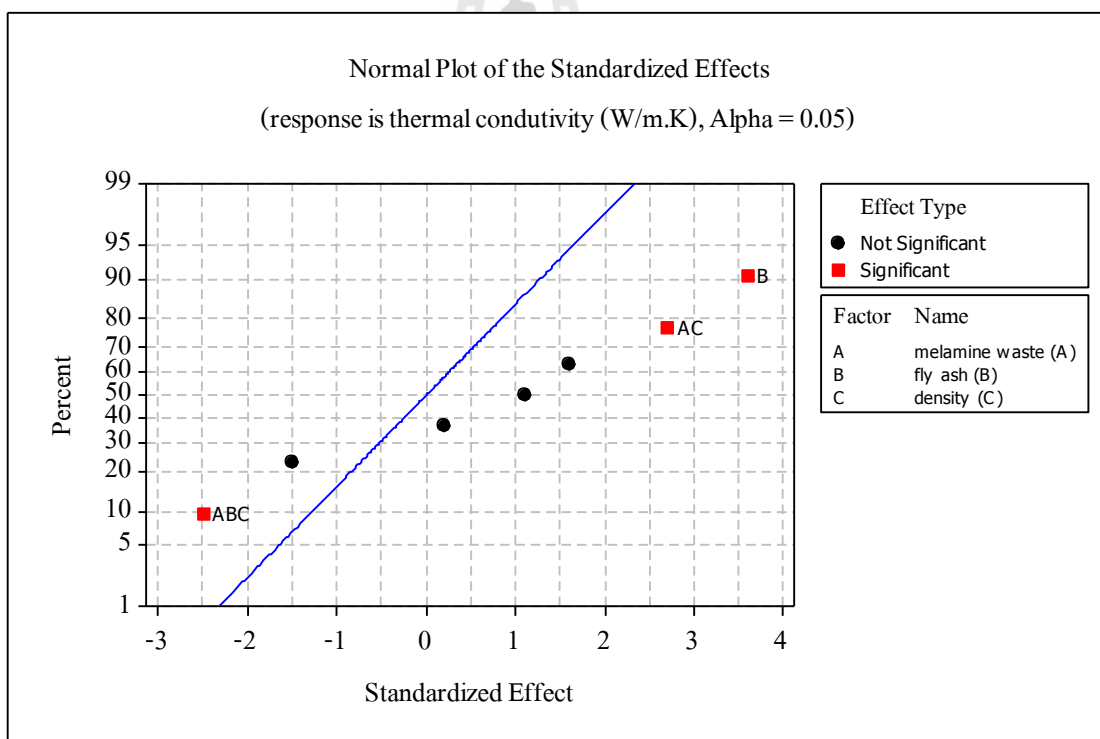
และจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย ในการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
ค่าคงที่		0.0900	0.00125	72.08	0.000
รูปแบบเศษ (A)	0.0028	0.001375	0.00125	1.10	0.299
เนื้อลอม (B)	0.0090	0.004500	0.00125	3.60	0.006
ความหนาแน่น (C)	0.0005	0.000250	0.00125	0.20	0.846
AB	-0.0038	-0.001875	0.00125	-1.50	0.167
AC	0.0068	0.003375	0.00125	2.70	0.024
BC	0.0040	0.002000	0.00125	1.60	0.144
ABC	-0.0063	-0.003125	0.00125	-2.50	0.034
S = 0.004994		R-Sq = 82.94%		R-Sq(adj) = 67.78%	

ตารางที่ 4.22 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียลและจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย ในการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา

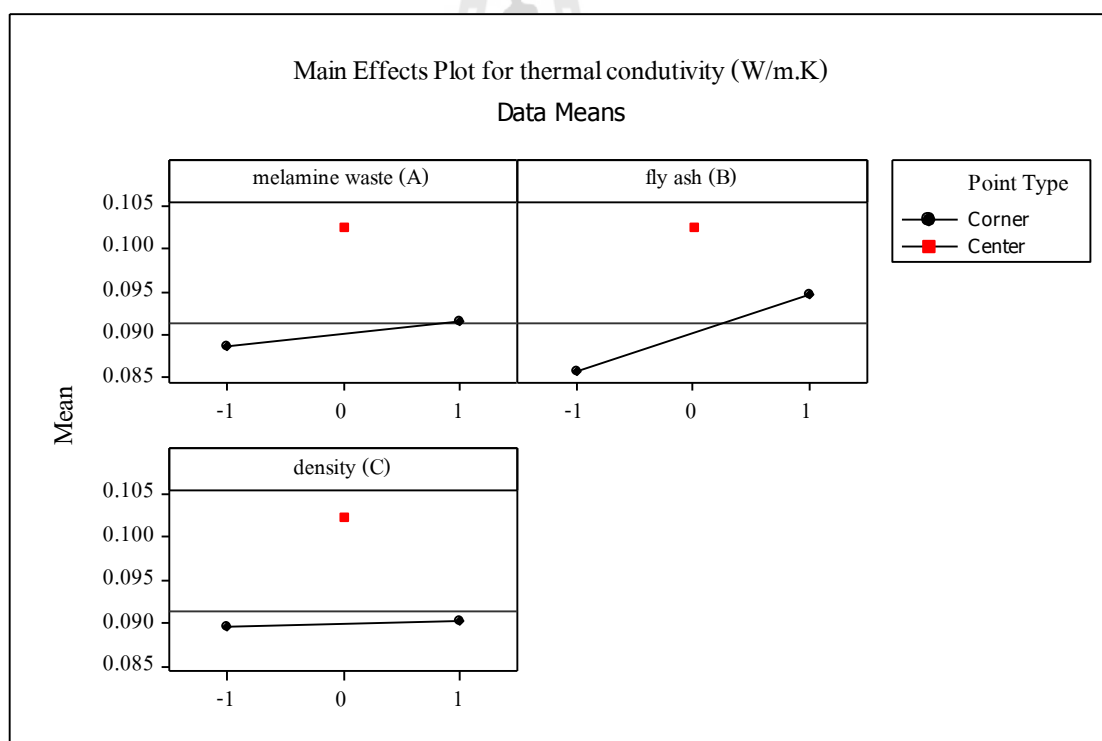
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	0.000355	0.000355	0.000118	4.75	0.030
2-Way Interactions	3	0.000302	0.000302	0.000100	4.04	0.045
3-Way Interactions	1	0.000156	0.000156	0.000156	6.26	0.034
Curvature	1	0.000278	0.000278	0.000278	11.14	0.009
Residual Error	9	0.000225	0.000225	0.000025		
Pure Error	9	0.000225	0.000225	0.000025		
Total	17	0.001316				

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแผนการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 4.21 พบว่า อิทธิพลเนื่องจากปัจจัยหลัก เถ้าลอย (B) และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยเศษเมลามีนกับความหนาแน่น (AC) และ เศษเมลามีน เถ้าลอยกับความหนาแน่น (ABC) มีอิทธิพลต่อการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} < 0.05$) ในขณะที่อิทธิพลเนื่องจากปัจจัยหลัก เศษเมลามีน (A) และความหนาแน่น (C) และอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัยของ เศษเมลามีนกับเถ้าลอย (AB) และ เถ้าลอยกับความหนาแน่น (BC) ไม่มีอิทธิพลต่อการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน อย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} > 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.42 ที่แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยหลัก B และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย AC และ ABC มีอิทธิพลต่อการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน อย่างมีนัยสำคัญ โดยสังเกตได้จากจุดของปัจจัย B AC และ ABC มีแนวโน้มไม่ได้อยู่บนเส้นตรงของแผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติของตัวประมาณอิทธิพลใด ๆ



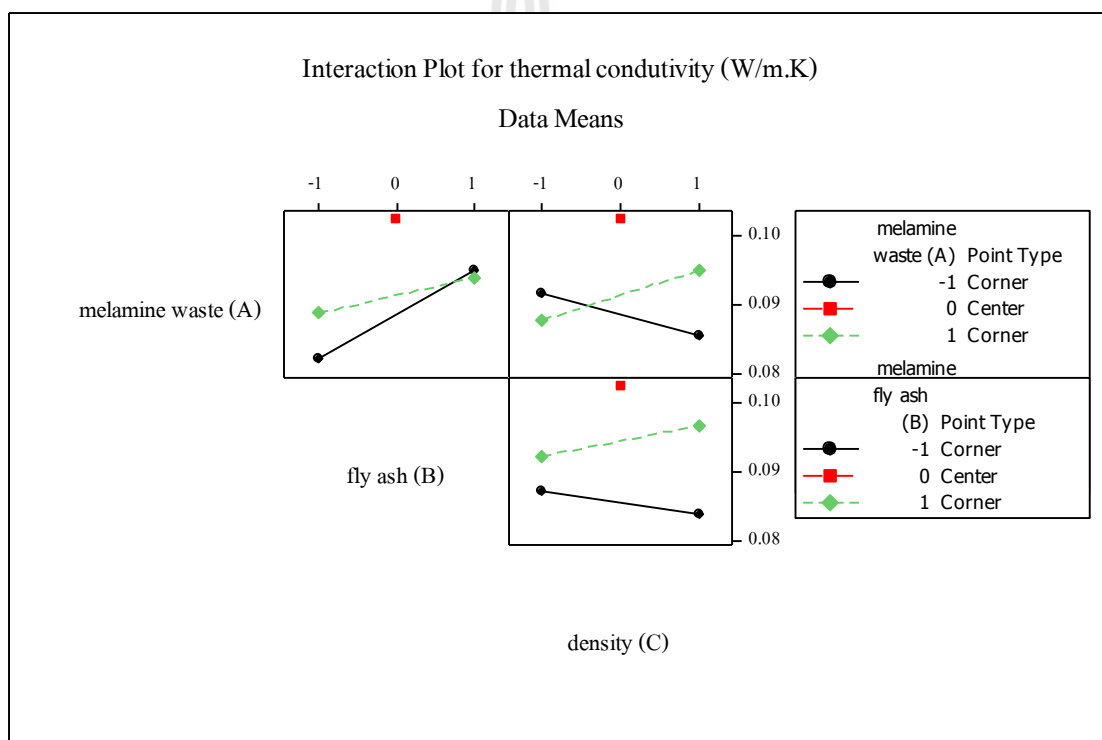
รูปที่ 4.42 ความน่าจะเป็นแบบปกติของตัวประมาณของอิทธิพลทั้งหมดของการนำความร้อน

จากการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก ทั้งสามปัจจัยประกอบด้วย เศษเมลามีน (A), เถ้าลอย (B), และความหนาแน่น (C) ที่มีอิทธิพลต่อการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน แสดงดังรูปที่ 4.43 พบว่า ความชันของปัจจัยหลัก เศษเมลามีน (A) และ เถ้าลอย (B) มีค่าเป็นบวก หมายถึง การเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่งหน่วยเป็นผลทำให้ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองเพิ่มขึ้น กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอิทธิพล เศษเมลามีน (A) และ เถ้าลอย (B) มีผลต่อการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ความชันของปัจจัยหลัก ความหนาแน่น (C) มีค่าเป็นลบ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่งหน่วยเป็นผลทำให้ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองลดลง กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอิทธิพล ความหนาแน่น (C) มีผลต่อการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน ลดลง และรูปแบบสมการถดถอยของค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของตำแหน่งจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย 2 ซ้ำ มีแนวโน้มไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งดูได้จากค่า p-value ของ curvature (ตารางที่ 4.22) ที่ต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ ($\alpha=0.05$)



รูปที่ 4.43 การประมาณอิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลอง 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา

จากการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย (interaction plot) แสดงดังรูปที่ 4.44 พบว่า ความชันของอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย AB มีค่าเป็นบวกหมายถึง การเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่งหน่วยเป็นผลทำให้ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ความชันของอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย AC และ BC มีค่าเป็นลบ หมายถึงการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่งหน่วยเป็นผลทำให้ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองลดลง อีกทั้ง การเพิ่มขึ้นของอิทธิพลเศษเมลามีนกับความหนาแน่น (AC) มีผลต่อการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วันเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ คู่ได้จากความชันที่แตกต่างกัน ขณะที่อิทธิพลของเศษเมลามีนกับเถ้าลอย (AB) และเถ้าลอยกับความหนาแน่น (BC) ไม่มีผลต่อการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความชันที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.44 การประมาณอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของแผนการทดลอง 2^3 แฟกทอเรียล ในการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา

4.8.3 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยของการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา

จากการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยของการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบ 2^3 แฟกทอเรียล พบว่า รูปแบบสมการถดถอยของค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของตำแหน่งจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย 2 ซ้ำ มีแนวโน้มไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งดูได้จากค่า p-value ของ curvature (ตารางที่ 4.22) ที่ต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ ($\alpha=0.05$) อีกทั้งแบบจำลองเพื่อแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ โดยการพิจารณาอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน สามารถเขียนแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นได้ดังนี้

$$Y_{TC} = 0.0900 + 0.0045B \quad (4.4)$$

เมื่อพิจารณาค่า R^2 (adj) แสดงดังตาราง 4.22 พบว่า ระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม มีความสัมพันธ์กันในระดับดี โดยมีค่าเท่ากับ 67.78%

จากแบบจำลองการถดถอยแสดงดังสมการที่ 4.4 ผู้วิจัยสามารถใช้พยากรณ์ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาจากการออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตได้ หรือใช้กำหนดระดับปัจจัยเพื่อให้ค่าการนำความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากการออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีต ให้มีค่าการนำความร้อนเป็นไปตามที่ต้องการได้ แต่มีข้อจำกัดที่ระดับปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นจะต้องอยู่ในช่วงระดับที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

4.8.4 การกำหนดระดับของปัจจัยเพื่อทำนายค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา

ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดระดับของปัจจัยต่าง ๆ จำนวน 4 การออกแบบสัดส่วนผสม ประกอบด้วย ระดับของปัจจัยเศษเมลามีน ใ้ลลย และความหนาแน่นเท่ากับ (0, -1, -1) (0, 1, -1) (0, -1, 1) และ (0, 1, 1) ตามลำดับ โดยมีปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยแสดงดังตารางที่ 4.23 ซึ่งผลทำนายค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน สามารถหาได้จากการแทนระดับของแต่ละปัจจัยลงในแบบจำลองการถดถอย (สมการที่ 4.4) โดยผลทำนายค่านำความร้อนมีค่าเท่ากับ 0.0922 0.0837 และ 0.0986 W/m.K ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 การกำหนดระดับของปัจจัยเพื่อทำนายค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา

รหัสผสม	ระดับของปัจจัย			การนำความร้อน (W/m.K)
	เศษเมลามีน	ใ้ลลย	ความหนาแน่น	ทำนาย
MFGP25D11	0	-1	-1	0.0872
MFGP25FA10D11	0	1	-1	0.0922
MFGP25D13	0	-1	1	0.0837
MFGP25FA10D13	0	1	1	0.0986

4.8.5 การทดสอบยืนยันผลการทำนายค่าการนำความร้อน

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน เพื่อเปรียบเทียบผลทำนายจากสมการแบบจำลองการถดถอย ของปัจจัยเศษเมลามีน ใ้ลลย และความหนาแน่นเท่ากับ (0, -1, -1) (0, 1, -1) (0, -1, 1) และ (0, 1, 1) จำนวน 2 ซ้ำ ของแต่ละการออกแบบสัดส่วนผสม ซึ่งได้ค่าเฉลี่ยการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน เท่ากับ 0.0825 0.1402 0.0795 และ 0.0965 W/m.K ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24 การกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง

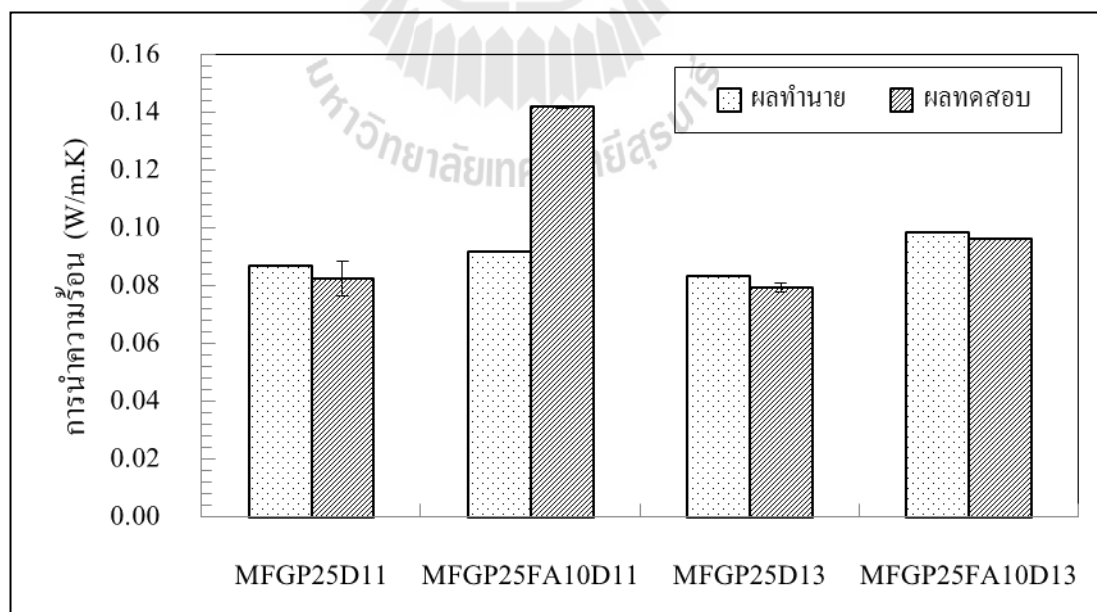
รหัสผสม	ระดับของปัจจัย			ค่าการนำความร้อน (W/m.K)		
	เศษเมลามีน	ใ้ลลย	ความหนาแน่น	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
MFGP25D11	0	-1	-1	0.0820	0.0830	0.0825
MFGP25FA10D11	0	1	-1	0.148	0.136	0.1420
MFGP25D13	0	-1	1	0.079	0.080	0.0795
MFGP25FA10D13	0	1	1	0.095	0.098	0.0965

ตารางที่ 4.25 แสดงผลเปรียบเทียบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน ระหว่างผลทำนายจากแบบจำลองการถดถอยและผลการทดสอบจริง ที่ระดับของปัจจัยเศษเมลามีน ใถ้าลอย และความหนาแน่น (0, -1, -1) (0, 1, -1) (0, -1, 1) และ (0, 1, 1) ตามลำดับ เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือและความคลาดเคลื่อนของสมการแบบจำลองการถดถอย จากการเปรียบเทียบพบว่า ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน ที่ได้จากผลการทำนายและผลการทดสอบจริง มีความใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.45 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 12.06

ตารางที่ 4.25 ผลเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน

ของผลทำนายและผลการทดสอบจริง

ลำดับ ที่	รหัส	ระดับของปัจจัย			การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)		ความคลาด เคลื่อน (ร้อยละ)
		เศษ เมลามีน	ใถ้าลอย	ความ หนาแน่น	ทำนาย	ทดสอบ	
1	MFGP25D11	0	-1	-1	0.0872	0.0825	5.70
2	MFGP25FA10D11	0	1	-1	0.0922	0.1420	35.07
3	MFGP25D13	0	-1	1	0.0837	0.0795	5.28
4	MFGP25FA10D13	0	1	1	0.0986	0.0965	2.18



รูปที่ 4.45 ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาอายุ 28 วัน ของผลทำนายและผลการทดสอบจริง

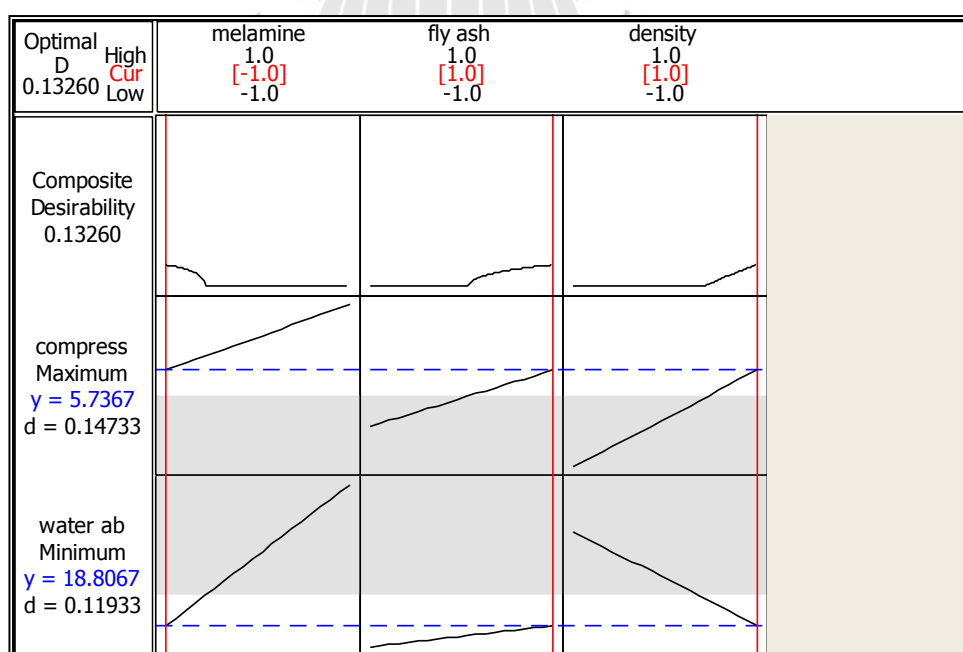
4.9 การกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง

ปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลองสามารถหาได้จากสมการแบบจำลองถดถอย โดยผู้วิจัยต้องการทราบจุดที่เหมาะสมของปัจจัยทั้ง 3 ประกอบด้วย ปัจจัยเศษเมลามีน ปัจจัยเถ้าลอย และปัจจัยความหนาแน่น ที่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำ ซึ่งการวิเคราะห์ผลตอบสนองหลายตัว (multiple responses) สามารถดำเนินการด้วยวิธีฟังก์ชันความพึงพอใจ (desirability function) โดยผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์ของผลตอบสนองดังนี้ กำลังรับแรงอัดมากที่สุด (maximization) และการดูดซึมน้ำน้อยที่สุด (minimization) แสดงดังตารางที่ 4.26

ตารางที่ 4.26 การกำหนดวัตถุประสงค์ของผลตอบสนองหลายตัว

Parameters	Goal	Lower	Target	Upper
Compressive strength (MPa)	Maximum	5	10	10
Water absorption (%)	Minimum	10	10	20

ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองหลายตัวด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab Version 16 แสดงดังรูปที่ 4.46 โดยระดับปัจจัยหลักทั้งสามที่เหมาะสมคือ (-1, 1, 1) ซึ่งทำให้ได้ผลตอบสนองของกำลังรับแรงอัดสูงสุด 5.74 เมกะพาสกัล และค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุดร้อยละ 18.80



รูปที่ 4.46 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับผลตอบสนองหลายตัว

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่การควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสด 1,300 กก/ม.³ โดยการแทนที่ทรายด้วยเศษเม็ดเมลามีนร้อยละ 25 และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 (MFG25FA10D13) แสดงดังตารางที่ 4.27 และ 4.28

ตารางที่ 4.27 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่รหัสผสม MFG25FA10D13

ชั้นทดสอบ	ความหนาแน่น (kg/m ³)	กำลังรับแรงอัด (MPa)
1	1,342	5.77
2	1,324	5.88
3	1,308	5.60
4	1,306	5.39
5	1,323	6.54
6	1,312	7.00
7	1,337	4.33
8	1,362	7.47
9	1,343	3.27
10	1,311	4.81
11	1,312	6.79
12	1,315	6.31
13	1,304	6.53
14	1,338	6.79
15	1,361	7.29
16	1,306	6.31
17	1,318	6.01
18	1,301	4.54
19	1,302	5.66
20	1,347	5.60

ตารางที่ 4.28 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่รหัสผสม MFG25FA10D13

ชั้นทดสอบ	ความหนาแน่น (kg/m ³)	การดูดซึมน้ำ (%)
1	1,368	15.56
2	1,369	15.80
3	1,355	15.94
4	1,368	15.48
5	1,362	15.45

ผลการทดสอบเพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสม (-1, 1, 1) สำหรับผลตอบสนองของค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและการดูดซึมน้ำต่ำสุด ที่รหัสผสม MFG25FA10D13 ของคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,300 กก/ม.³ โดยมีการแทนที่ทรายด้วยเศษเม็ดเมลามีน ร้อยละ 25 และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาทรงลูกบาศก์ขนาด 10 ซม. ที่อายุ 28 วัน ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดและค่าการดูดซึมน้ำได้จากค่าเฉลี่ยของชิ้นทดสอบจำนวน 20 ก้อน และ 8 ก้อน ตามลำดับ จากการทดสอบคอนกรีตมวลเบารหัสผสม MFG25FA10D13 พบว่า มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 5.89 เมกะพาสคัล และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละเท่ากับ 17.60 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับผลตอบสนองของกำลังรับแรงอัดสูงสุด 5.74 เมกะพาสคัล และค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุดร้อยละ 18.81 โดยผลการทดสอบเพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือมีค่าความคลาดเคลื่อนของการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำร้อยละ 2.61 และ 6.81 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.29

ตารางที่ 4.29 ผลการทดสอบเพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสม

	เศษเมลามีน	เถ้าลอย	ความหนาแน่น	กำลังรับแรงอัด (MPa)	การดูดซึมน้ำ (%)
ปัจจัยที่เหมาะสม	-1	1	1	5.74	18.80
การทดสอบจริง	MFG25	FA10	D13	5.89	17.60
ความคลาดเคลื่อน (%)				2.61	6.81

จากการศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ปกติ (MF0) อายุ 28 วัน ที่ความหนาแน่น 1,000 1,100 และ 1,300 กก/ม.³ มีค่าเท่ากับ 1.21 1.79 และ 2.74 เมกะพาสคัล ตามลำดับซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัย Jones and McCarthy (2005) ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ ที่ความหนาแน่น 1,000 1,100 และ 1,300 กก/ม.³ อายุ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 4.30

ตารางที่ 4.30 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์กับงานวิจัยต่างประเทศ

Authors	Type of concrete and density	Material	Compressive strength
Jones and McCarthy (2005)	cellular lightweight concrete (1,000 1,200 and 1,400 kg/m ³)	cement-sand-water	1.0 1.5 and 2.0 MPa
Chalermchai (2016)	cellular lightweight concrete (1,000 1,100 and 1,300 kg/m ³)	cement-sand-water	1.21 1.79 and 2.74 MPa

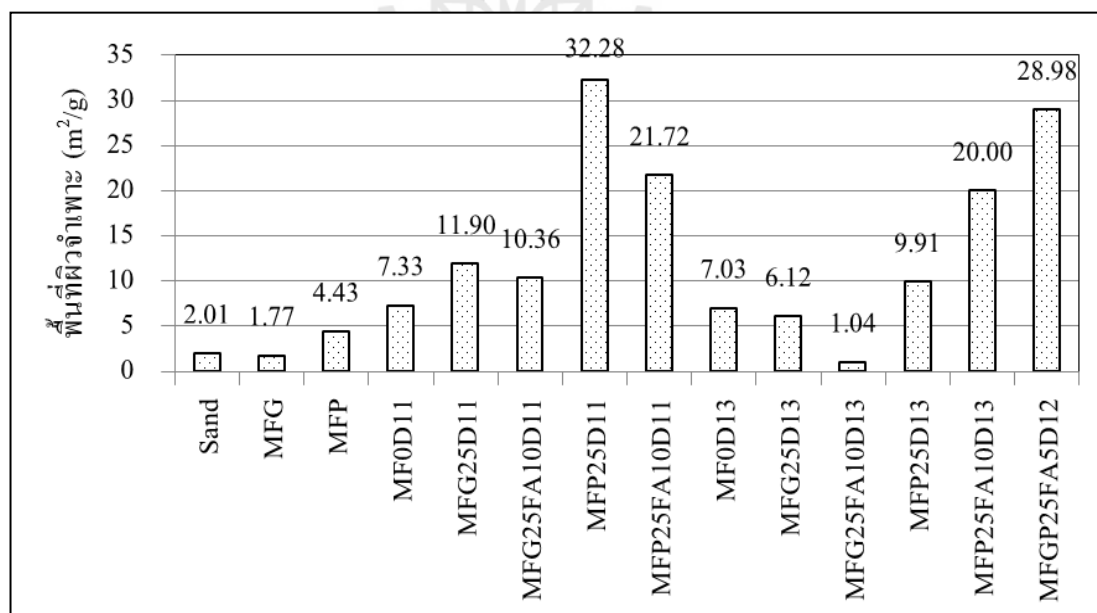
4.10 ความพรุนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

ผลการทดสอบความพรุนของวัสดุมวลรวมละเอียด (ทรายละเอียดและเศษฝุ่นเมลามีน) และคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ โดยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller) ซึ่งเป็นการวัดความพรุนโดยอาศัยการดูดซับ (adsorption) ของก๊าซไนโตรเจนที่สามารถแทรกเข้าไปถึงได้ ทั้งบนผิวและภายในรูพรุนของตัวอย่างทดสอบ ผลการทดสอบความพรุนแสดงดังตารางที่ 4.31

ตารางที่ 4.31 ความพรุนของวัสดุมวลรวมละเอียดและคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

ชั้นทดสอบ	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุนรวม (cm^3/g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)
Sand	2.0093	0.0095813	19.074
MFG	1.7710	0.0089809	20.285
MFP	4.4269	0.0267760	24.194
MF0D11	7.3325	0.0420160	22.921
MFG25D11	11.9040	0.0552850	18.577
MFG25FA10D11	10.3610	0.0472820	18.254
MFP25D11	32.2800	0.0965350	11.962
MFP25FA10D11	21.7150	0.0965930	17.793
MF0D13	7.0270	0.0448800	25.547
MFG25D13	6.1162	0.0445770	29.153
MFG25FA10D13	1.0428	0.0449770	17.252
MFP25D13	9.9108	0.0577070	23.291
MFP25FA10D13	20.0022	0.0671110	13.421
MFGP25FA5D12	28.9840	0.0859510	11.862

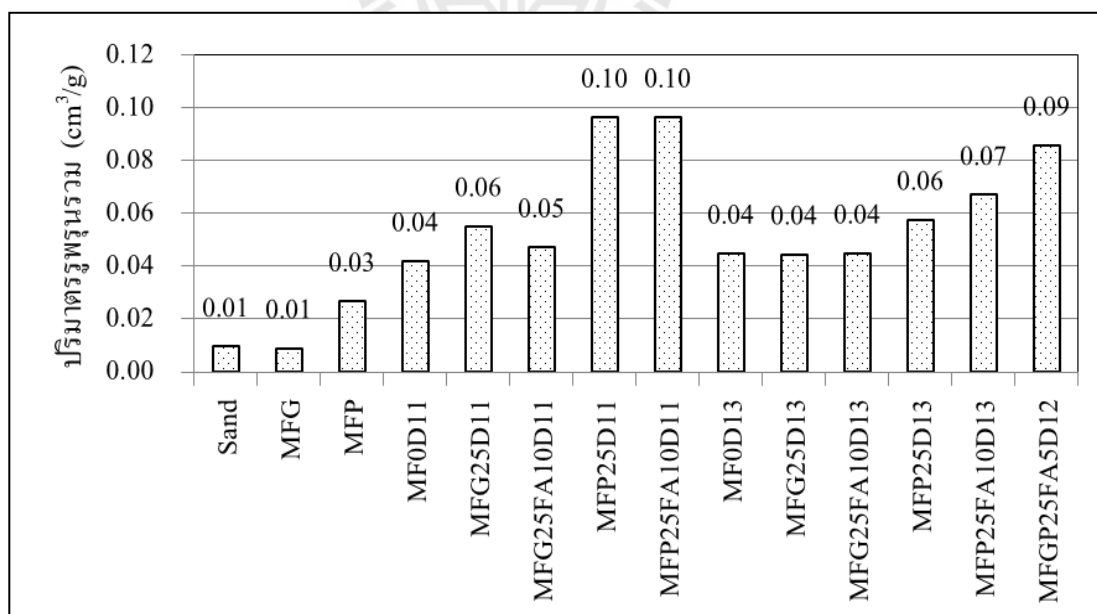
พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุรวมละเอียดและคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ผสมเศษเมลามีน ที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 กก./ม.³ แสดงดังรูปที่ 4.47 พบว่า เศษฝุ่นเมลามีนมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 4.43 m²/g ซึ่งมากกว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวมละเอียดทรายสองเท่าโดยประมาณ ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวมละเอียดทรายมีค่าเท่ากับ 2.01 m²/g ขณะที่เศษเม็ดเมลามีนมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 1.77 m²/g ซึ่งมีค่าน้อยกว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวมละเอียดทรายเล็กน้อย เนื่องจากเศษเม็ดเมลามีนมีส่วนผิวเดิมที่เรียบและส่วนที่เกิดจากการบดย่อยที่มีลักษณะขรุขระและรูโพรง ซึ่งสอดคล้องกับภาพขยายของวัสดุรวมละเอียด (ทราย เศษเม็ด และเศษฝุ่นเมลามีน) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.1 ด้วยเหตุที่ เศษฝุ่นเมลามีนมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากกว่ามวลรวมละเอียดทรายและเศษเม็ดเมลามีนนั้น จึงทำให้ คอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด เมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาผสม เศษเม็ดเมลามีนและคอนกรีตมวลเบาปกติ จากการทดสอบยังพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสม เศษเมลามีนมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนแสดงพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด และยังพบอีกว่าความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะของคอนกรีตมวลเบาลดลง



รูปที่ 4.47 พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุรวมละเอียดและคอนกรีตมวลเบา ความหนาแน่น 1,100 1,200 และ 1,300 กก./ม.³

รูปที่ 4.48 แสดงปริมาณรุกรานรวมของวัสดุมวลรวมละเอียดและคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 กก./ม.³ พบว่า เศษฝุ่นเมลามีนมีปริมาณรุกรานรวมเท่ากับ 0.03 cm³/g ซึ่งมากกว่าปริมาณรุกรานของมวลรวมละเอียดทรายและเศษเม็ดเมลามีนถึงสามเท่าโดยประมาณ โดยปริมาณรุกรานของมวลรวมละเอียดทรายและเศษเม็ดเมลามีนมีค่าเท่ากับ 0.01 cm³/g จากการทดสอบยังพบอีกว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนส่งผลให้ปริมาณรุกรานรวมของคอนกรีตมวลเบามีแนวโน้มสูงขึ้น โดยเฉพาะคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนที่มีปริมาณรุกรานรวมสูงสุด และยังพบอีกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยยังส่งผลให้ปริมาณรุกรานรวมของคอนกรีตมวลเบามีแนวโน้มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน อีกทั้งความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มขึ้นยังทำให้ปริมาณรุกรานรวมของคอนกรีตมวลเบาลดลง

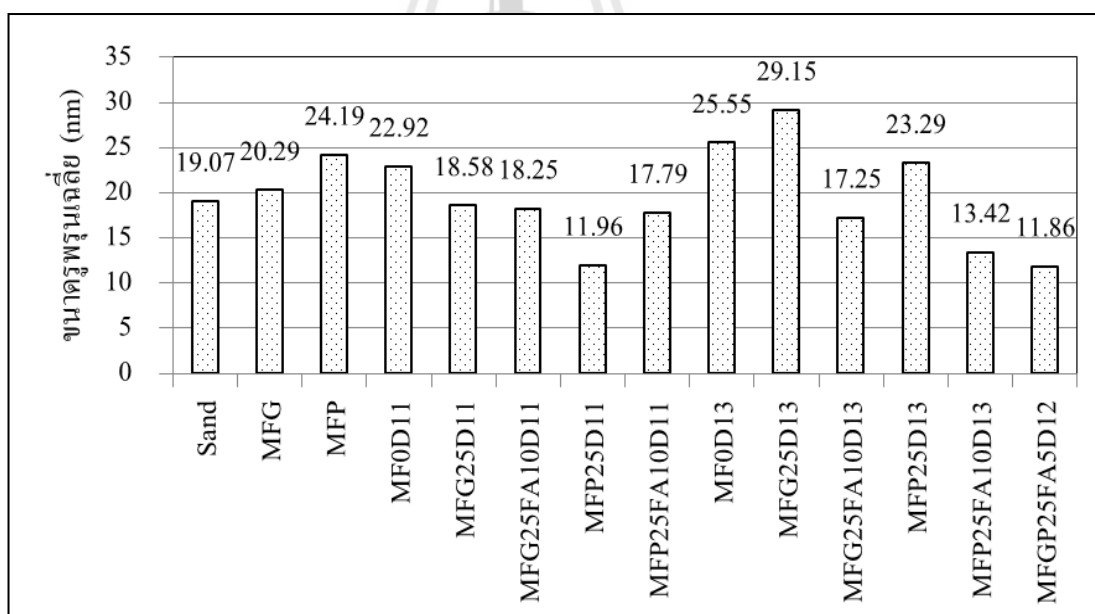
การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ส่งผลให้ปริมาณรุกรานของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเป็นการเพิ่มปริมาณของซีเมนต์เพสต์ ส่งผลให้ปริมาณรุกรานรวมในคอนกรีตมวลเบาเพิ่มมากขึ้น (ปริญาจินดาประเสริฐ, 2553) และจากเหตุผลดังกล่าว การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนจึงส่งผลให้ปริมาณรุกรานของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากเศษเมลามีนมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่ามวลรวมละเอียดทราย



รูปที่ 4.48 ปริมาณรุกรานรวมของวัสดุมวลรวมละเอียดและคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,100 1,200 และ 1,300 กก./ม.³

รูปที่ 4.49 แสดงขนาดรูพรุนเฉลี่ยของวัสดุมวลรวมละเอียดและคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 กก./ม.³ พบว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนส่งผลให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาที่มีแนวโน้มน้ำเล็กลง อีกทั้งการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถั่วลยยังส่งผลให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาที่มีแนวโน้มน้ำเล็กลงเช่นเดียวกัน

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถั่วลยส่งผลให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของคอนกรีตมวลลดลง เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถั่วลยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตลดลง ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำชะลอตัวออกไป ทำให้ผลิตผลไฮเดรชันมีเวลามากพอในการเข้าไปแทรกในช่องว่าง ส่งผลให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาเล็กลง (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2553) อีกทั้งการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนยังส่งผลให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของคอนกรีตมวลลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนทำให้ปริมาณทรายน้อยลง ส่งผลให้ปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกากระหว่าง Na_2O และ K_2O กับมวลรวมทรายน้อยลง (ปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกาเป็นสาเหตุทำให้คอนกรีตขยายตัวและคอนกรีตแตกร้าว) ส่งผลให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาเล็กลงเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.49 ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของวัสดุมวลรวมละเอียดและคอนกรีตมวลเบา ความหนาแน่น 1,100 1,200 และ 1,300 กก./ม.³

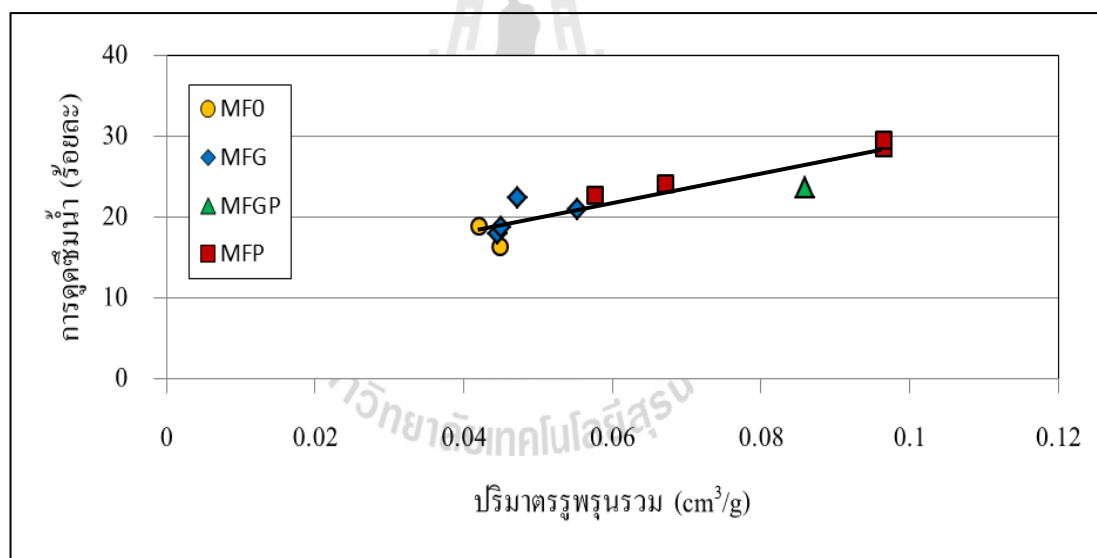
จากผลการทดสอบความพรุนของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน โดยวิธี BET ทำให้ผู้วิจัยเห็นถึงความสัมพันธ์ของข้อมูลระหว่างปริมาตรรูพรุนรวมและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่อายุ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 4.32 พบว่า ทั้งความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา รูปแบบเศษเมลามีนและการแทนที่ทรายด้วยเถ้าลอย ต่างมีผลต่อปริมาตรรูพรุนรวมของคอนกรีตมวลเบา ซึ่งปริมาตรรูพรุนรวมดังกล่าวมีผลโดยตรงต่อที่ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรูพรุนรวมและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่อายุ 28 วัน แสดงดังรูปที่ 4.50

ตารางที่ 4.32 ปริมาตรรูพรุนรวมและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

ชั้นทดสอบ	ปริมาตรรูพรุนรวม (cm ³ /g)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
MF0D11	0.0420160	18.99
MFG25D11	0.0552850	21.08
MFG25FA10D11	0.0472820	22.42
MFP25D11	0.0965350	28.60
MFP25FA10D11	0.0965930	29.62
MFGP25FA5D12	0.0859510	23.74
MF0D13	0.0448800	16.46
MFG25D13	0.0445770	18.00
MFG25FA10D13	0.0449770	18.81
MFP25D13	0.0577070	22.76
MFP25FA10D13	0.0671110	24.22

รูปที่ 4.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรุกรุนรวมและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่อายุ 28 วัน จากความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่า ปริมาณรุกรุนรวมและค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง โดยลักษณะการเพิ่มขึ้นของปริมาณรุกรุนรวมส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้น ซึ่งระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม มีความสัมพันธ์กันในระดับดี ($R^2=83.67\%$)

จากความสัมพันธ์สามารถกล่าวได้ว่า การแทนที่ทรายด้วยเศษเม็ดเมลามีน (จุดสีน้ำเงิน) ส่งผลให้ปริมาณรุกรุนรวมของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ (จุดสีเหลือง) การเพิ่มขึ้นของปริมาณรุกรุนรวมนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแทนที่ทรายด้วยเศษฝุ่นเมลามีน (จุดสีแดง) แสดงปริมาณรุกรุนรวมสูงสุด จึงทำให้คอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด

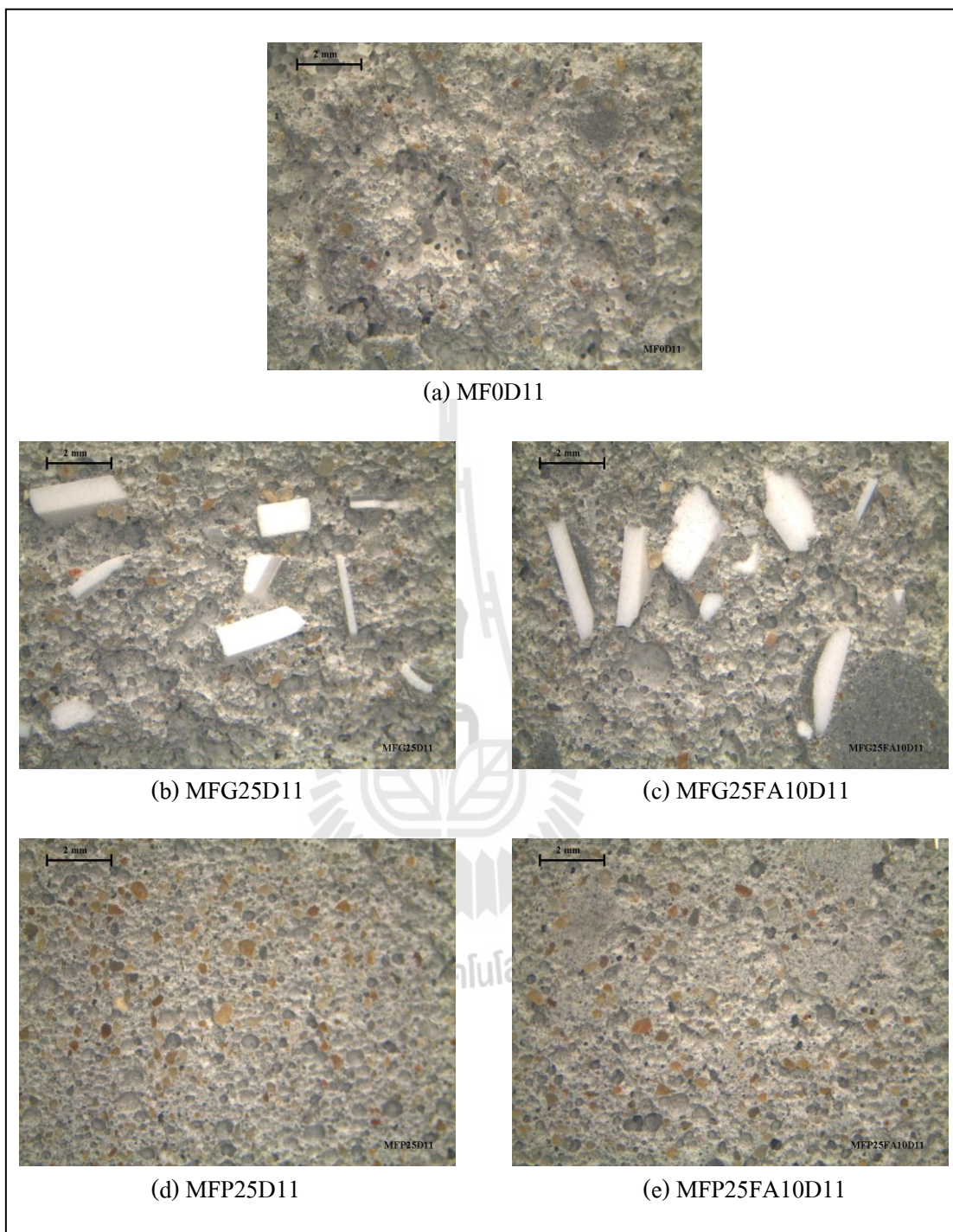


รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรุกรุนรวมและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์อายุ 28 วัน

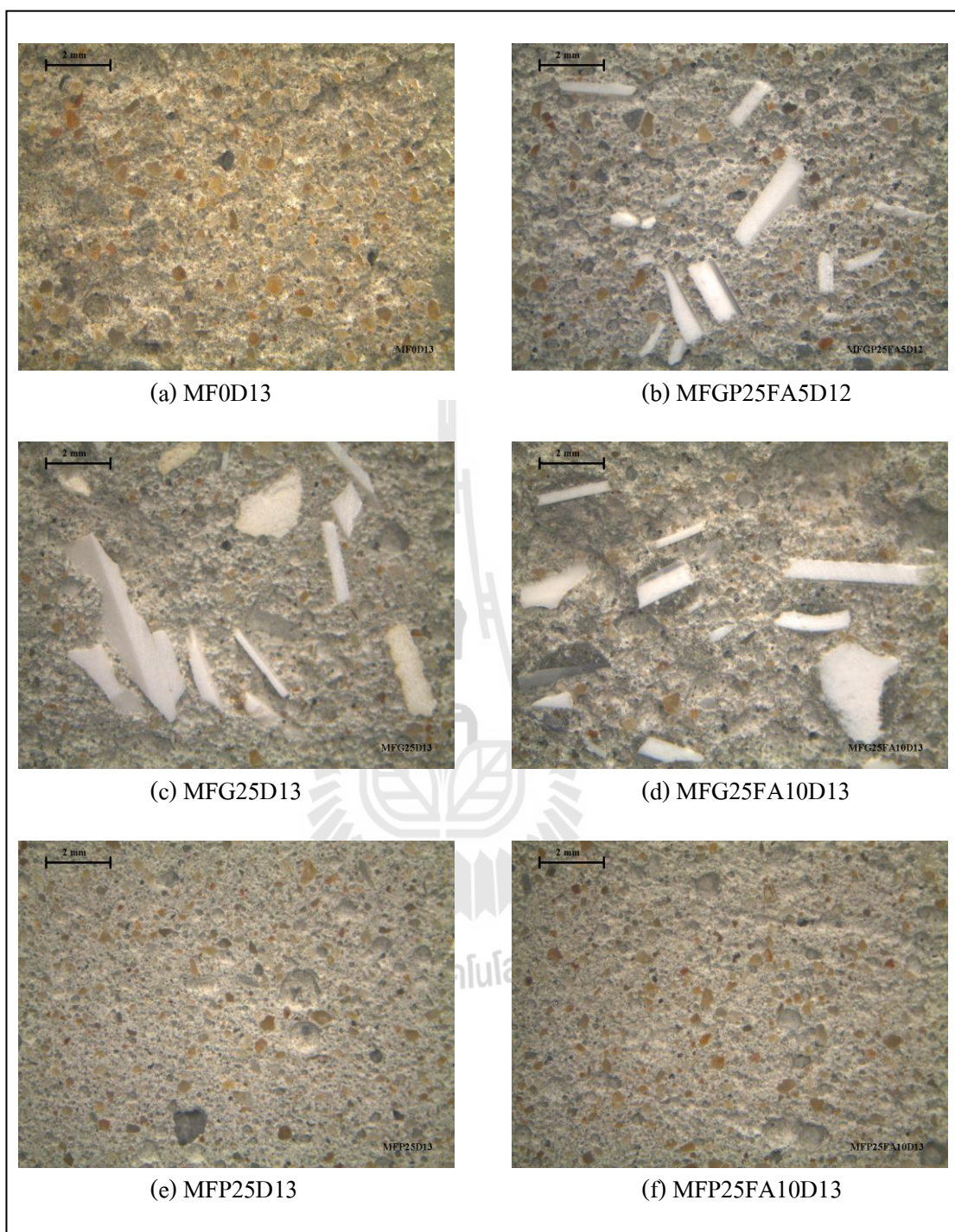
4.11 การวิเคราะห์ภาพถ่ายจุลทรรศน์ออปติคอลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

การวิเคราะห์ภาพถ่ายหน้าตัดเรียบ (polished section) ของคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,100 กก./ม.³ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคอลที่กำลังขยาย 5 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.51 พบว่า คอนกรีตมวลเบาปกติ (MF0D11) มีมวลรวมละเอียดทราย (เฟสสีน้ำตาล) กระจายตัวได้ดีทั่วทั้งหน้าตัด โดยเนื้อของซีเมนต์เพสต์ค่อนข้างขรุขระ สำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีน (MFG25D11 และ MFG25FA10D11) มีมวลรวมละเอียดทราย (เฟสสีน้ำตาล) และเศษเม็ดเมลามีน (เฟสสีขาว) กระจายตัวได้ค่อนข้างดี โดยเนื้อของซีเมนต์เพสต์ขรุขระน้อยกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ สำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมฝุ่นเม็ดเมลามีน (MFP25D11 และ MFP25FA10D11) จะสังเกตเห็นเฉพาะมวลรวมละเอียดทราย (เฟสสีน้ำตาล) กระจายตัวได้ดีมากทั่วทั้งหน้าตัด โดยมีเนื้อของซีเมนต์เพสต์ค่อนข้างเรียบและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) มากกว่า เมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติและคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีน โดยที่เศษฝุ่นเมลามีน (MFP) ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยภาพถ่ายจุลทรรศน์ออปติคอลเนื่องจากมีอนุภาคที่เล็กมาก

สำหรับการวิเคราะห์ภาพถ่ายผิวหน้าตัดเรียบของคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,200 และ 1,300 กก./ม.³ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคอลที่กำลังขยาย 5 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.52 พบว่า คอนกรีตมวลเบาปกติ (MF0D13) มีมวลรวมละเอียดทราย (เฟสสีน้ำตาล) กระจายตัวได้ดีทั่วทั้งหน้าตัด เช่นเดียวกัน โดยเนื้อของซีเมนต์เพสต์มีความขรุขระน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติความหนาแน่น 1,100 กก./ม.³ (MF0D11) สำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีน (MFG25D13 และ MFG25FA10D13) มีมวลรวมละเอียดทราย (เฟสสีน้ำตาล) และเศษเม็ดเมลามีน (เฟสสีขาว) กระจายตัวได้ค่อนข้างดี โดยเนื้อของซีเมนต์เพสต์ขรุขระน้อยกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติ (MF0D13) ขณะที่คอนกรีตมวลเบาผสมฝุ่นเม็ดเมลามีน (MFP25D13 และ MFP25FA10D13) จะสังเกตเห็นเฉพาะมวลรวมละเอียดทราย (เฟสสีน้ำตาล) กระจายตัวได้ดีมากทั่วทั้งหน้าตัด โดยมีเนื้อของซีเมนต์เพสต์ค่อนข้างเรียบและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) มากกว่า เมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติและคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีน สำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดและเศษฝุ่นเมลามีนความหนาแน่น 1,200 กก./ม.³ (MFGP25FA5D12) มีมวลรวมละเอียดทราย (เฟสสีน้ำตาล) และมวลรวมละเอียดเศษเม็ดเมลามีน (เฟสสีขาว) กระจายตัวได้ค่อนข้างดีทั่วทั้งหน้าตัด โดยเนื้อของซีเมนต์เพสต์ขรุขระน้อยกว่าคอนกรีตมวลเบาปกติที่ความหนาแน่น 1,100 กก./ม.³ (MF0D11) แต่ไม่เรียบเท่าคอนกรีตมวลเบาปกติที่ความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³ (MF0D13)



รูปที่ 4.51 ภาพ OM ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนความหนาแน่น 1,100 กก./ม.³

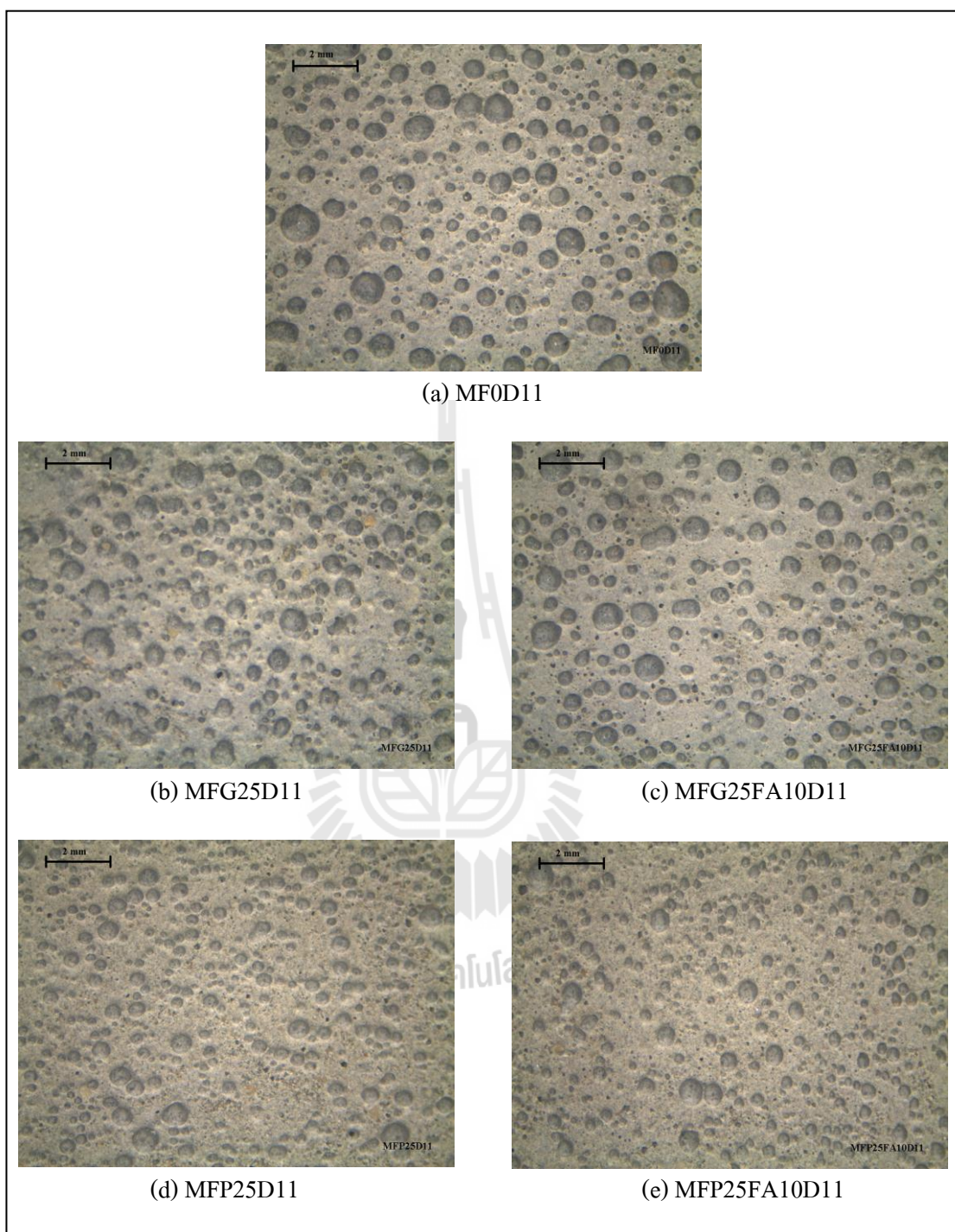


รูปที่ 4.52 ภาพ OM ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ผสมเศษเมลามีน
ความหนาแน่น 1,200 และ 1,300 กก./ม.³

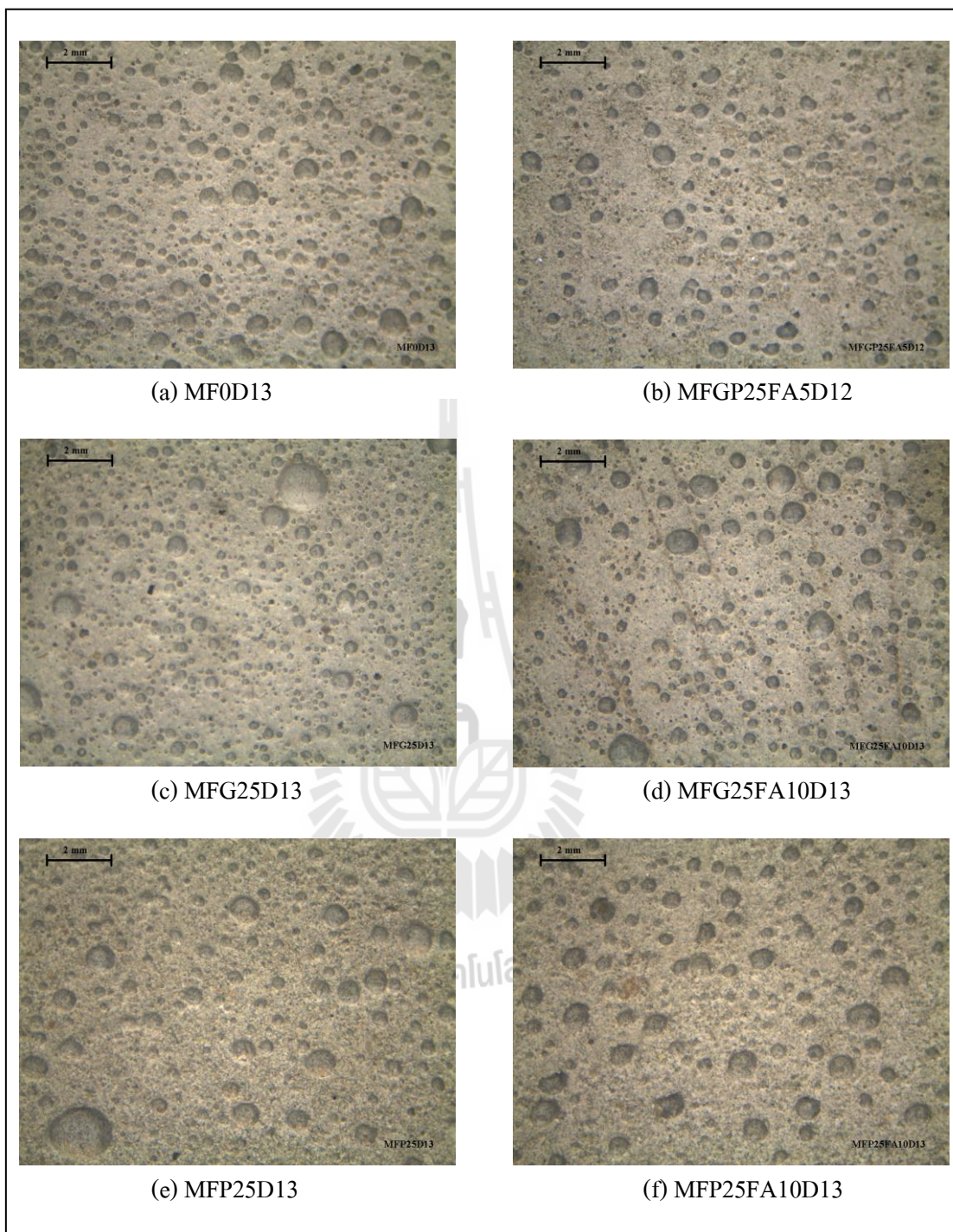
การวิเคราะห์โพรงอากาศแบบปิด (close pore) ของคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,100 กก./ม.³ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคอลที่กำลังขยาย 5 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.53 พบว่า คอนกรีตมวลเบาทุกสัดส่วนผสม มีการกระจายตัวของโพรงอากาศแบบปิดได้ดีทั่วทั้งหน้าตัด โดยการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนและการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ส่งผลให้โพรงอากาศแบบปิดมีขนาดเล็กลง ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของขนาดรูพรุนเฉลี่ยจากการทดสอบความพรุนโดยวิธี BET เนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกากระหว่าง Na_2O และ K_2O กับมวลรวมทรายที่ลดลง และจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำชะลอยตัวออกไป ส่งผลให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาลดลง ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.9

การวิเคราะห์โพรงอากาศแบบปิดของคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคอลที่กำลังขยาย 5 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.54 พบว่า คอนกรีตมวลเบาทุกสัดส่วนผสม มีการกระจายตัวของโพรงอากาศแบบปิดได้ดีทั่วทั้งหน้าตัด โดยการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนและการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ส่งผลให้โพรงอากาศแบบปิดมีขนาดเล็กลง เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์โพรงอากาศแบบปิดของคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,100 กก./ม.³





รูปที่ 4.53 ภาพ OM ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนความหนาแน่น 1,100 กก./ม.³

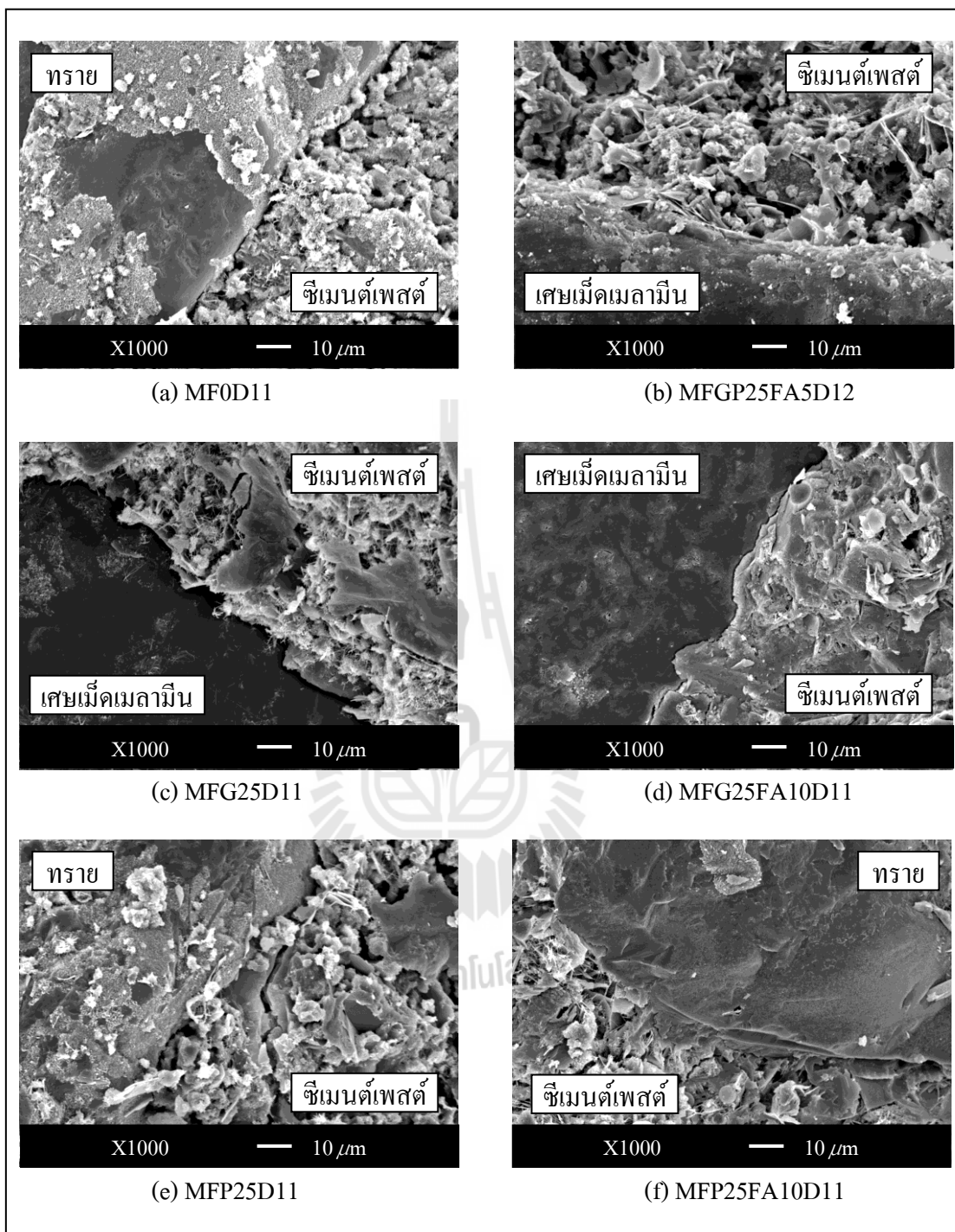


รูปที่ 4.54 ภาพ OM ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน
ความหนาแน่น 1,200 และ 1,300 กก./ม.³

4.12 การวิเคราะห์ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

การวิเคราะห์ภาพถ่ายผิวกะเทาะ (fractured surface) ของคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,100 และ 1,200 กก./ม.³ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.55 พบว่า คอนกรีตมวลเบาปกติ (MF0D11) มีการยึดเกาะกันระหว่างมวลรวมละเอียดทรายและซีเมนต์เพสต์ได้ดีค่อนข้างดี ซึ่งดูได้จากบริเวณแนวรอยต่อระหว่างทรายและซีเมนต์เพสต์ ขณะที่คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเม็ดเมลามีน (MFG25D11) มีการยึดเกาะกันระหว่างเศษเม็ดเมลามีนและซีเมนต์เพสต์ได้ดีเช่นเดียวกัน ซึ่งการยึดเกาะนี้เห็นได้ชัดเจนบริเวณผิวรอยแตกของเศษเม็ดเมลามีนที่เกิดจากการบดย่อยที่มีผิวขรุขระดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.1 อีกทั้งการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้ำลอย (MFG25FA10D11) ยังส่งผลให้การยึดเกาะกันระหว่างเศษเม็ดเมลามีนและซีเมนต์เพสต์ที่ดียิ่งขึ้น สังเกตได้จากบริเวณแนวรอยยึดเกาะระหว่างเศษเม็ดเมลามีนและซีเมนต์เพสต์มีช่องว่างที่เล็กลง กล่าวคือเศษเม็ดเมลามีนและซีเมนต์เพสต์มีการยึดเกาะกันในแบบแนบชิดยิ่งขึ้น สำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีน (MFP25D11) ไม่สามารถเห็นการยึดเกาะกันระหว่างเศษฝุ่นเมลามีนและซีเมนต์เพสต์ได้ เนื่องจากเศษฝุ่นเมลามีนมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก แต่หากเราสามารถเห็นการยึดเกาะกันระหว่างทรายและซีเมนต์เพสต์ที่ดีขึ้น อีกทั้งการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้ำลอย (MFP25FA10D11) ยังส่งผลให้การยึดเกาะกันระหว่างทรายและซีเมนต์เพสต์ที่ดียิ่งขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากบริเวณแนวรอยยึดเกาะระหว่างทรายและซีเมนต์เพสต์มีช่องว่างที่เล็กลง ขณะที่คอนกรีตมวลเบาผสมทั้งเศษเม็ดและเศษฝุ่นเมลามีนความหนาแน่น 1,200 กก./ม.³ (MFGP25FA5D12) มีการยึดเกาะกันระหว่างมวลรวมละเอียดทรายและซีเมนต์เพสต์ที่ดี ซึ่งดูได้จากแนวรอยต่อระหว่างทรายและซีเมนต์เพสต์ที่แคบลง

การยึดเกาะระหว่างเศษเม็ดเมลามีนและซีเมนต์เพสต์เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่บริเวณผิวของเศษเม็ดเมลามีนที่สามารถเกิดขึ้นได้ โดยการยึดเกาะดังกล่าวไม่แตกต่างจากการยึดเกาะระหว่างมวลรวมละเอียดทรายและซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนจึงไม่ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง ในทางตรงกันข้าม การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนกลับทำให้คอนกรีตมวลเบามีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น จึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.55 ภาพ SEM ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีน
ความหนาแน่น 1,100 และ 1,200 กก./ม.³

4.13 การชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์

ตารางที่ 4.33 แสดงผลการทดสอบการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักของปูนซีเมนต์ เชมเม็ดเมลามีน เชมฝุ่นเมลามีน และคอนกรีตมวลเบาผสมเชวมเมลามีนอายุมากกว่า 28 วัน ความหนาแน่น 1,100 กก./ม.³ ด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก (inductively coupled spectroscopy; ICP) โดยวิเคราะห์สารโลหะหนัก (leachable substances) ที่ถูกชะละลายได้จำพวก โครเมียม (Cr), ปรอท (Hg), ตะกั่ว (Pb), แคดเมียม (Cd), และสารหนู (As) ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้เป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของคนและเป็นพิษต่อสัตว์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หากโลหะหนักเหล่านี้ถูกชะละลายลงแหล่งน้ำจะทำให้เกิดมลพิษทางน้ำและเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำได้ จากการทดสอบพบว่า เชมเมลามีน (ทั้งแบบเม็ดและแบบฝุ่น) ที่ถูกกักเก็บด้วยปูนซีเมนต์ในรูปแบบของคอนกรีตมวลเบาสามารถช่วยลดปริมาณการชะละลายโลหะหนักลงได้ ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า การรีไซเคิลเชวมเมลามีนโดยใช้แทนที่ทรายบางส่วนในคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ สามารถช่วยลดปริมาณการชะละลายโลหะหนักลงได้ โดยปริมาณการชะละลายโลหะหนักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ผสมเชวมเมลามีนมีค่าไม่มากกว่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว แสดงดังตารางที่ 4.34

ตารางที่ 4.33 การชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักในคอนกรีตมวลเบา

ชั้นทดสอบ	ปริมาณสารโลหะหนักในสารชะละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)				
	Cr	Hg	Pb	Cd	As
Cement	1.551	0.000	0.000	0.001	0.036
MFG	0.002	0.031	0.020	0.006	0.102
MFP	0.039	0.219	0.119	0.007	0.043
MFG25D11	1.057	0.000	0.020	0.000	0.011
MFP25D11	0.036	0.000	0.000	0.000	0.006

ตารางที่ 4.34 ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

ปริมาณสารโลหะหนักในสารชะละลายไม่มากกว่า (มิลลิกรัม/ลิตร)				
Cr	Hg	Pb	Cd	As
5.0	0.2	5.0	1.0	5.0

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาผลกระทบของเศษเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ โดยใช้เป็นวัสดุผสมรวมละเอียดในการแทนที่ทรายบางส่วน ซึ่งผลการศึกษสามารถสรุปได้ดังนี้

- 5.1 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
- 5.2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
- 5.3 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
- 5.4 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
- 5.5 ความพรุนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
- 5.6 โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
- 5.7 การชะละลายสารปนเปื้อน โลหะหนักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์
- 5.8 ข้อเสนอแนะ

5.1 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

คอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนมีค่าความหนาแน่นแห้งแปรปรวนจากการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเล็กน้อย (น้อยกว่า ± 100 กก./ม.³) การแปรปรวนของความหนาแน่นแห้งเนื่องจาก การดูดซึมน้ำของเศษเมลามีน (ร้อยละ 5.51) ที่มีค่าสูงกว่าทราย (ร้อยละ 0.33) ทำให้ปริมาณน้ำในการผสมคอนกรีตมวลเบาเปลี่ยนแปลงไป อีกทั้งรูปร่างอนุภาคของเศษเมลามีนที่มีรูปร่างเหลี่ยมมุมและผิวที่ขรุขระ ซึ่งแตกต่างจากอนุภาคของทรายที่มีรูปร่างกลมมนผิวเรียบ ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคเศษเมลามีนในคอนกรีตมวลเบาคือต่ำกว่าทรายเล็กน้อย เป็นผลให้ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแปรปรวนไปจากการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเล็กน้อย

5.2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนส่งผลให้กำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ สามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลต่อไปนี้

1) ความสามารถในการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีน (ทั้งแบบเม็ดและแบบฝุ่น) ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่บริเวณผิวของเศษเมลามีนสามารถเกิดขึ้นได้ กล่าวคือซีเมนต์เพสต์สามารถยึดเกาะบริเวณผิวของเศษเมลามีนได้ อีกทั้งการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนยังทำหน้าที่คล้ายสารลดน้ำพิเศษ ซึ่งสามารถลดน้ำส่วนเกินที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดช่องว่างในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้น

2) ด้วยเหตุที่เศษเมลามีนมีรูปร่างเหลี่ยมมุมและผิวที่ขรุขระเป็นรูโพร่ง ทำให้มีพื้นที่ผิวสำหรับยึดเหนี่ยว ระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์มีมากขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเศษฝุ่นเมลามีนที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนมีค่ามากกว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเม็ดเมลามีน และคอนกรีตมวลเบาปกติตามลำดับ

3) การรวมกันระหว่างมวลรวมละเอียดทรายแม่น้ำและเศษเมลามีน ส่งผลให้เกิดขนาดคละของมวลรวมที่ดี ทำให้ช่องว่างของคอนกรีตมวลเบาลดลง กล่าวคือ คอนกรีตมวลเบาเกาะตัวกันได้ดี ไม่แยกตัว ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาดีขึ้น โดยเฉพาะการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนร้อยละ 25 ขณะที่การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนร้อยละ 35 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง เนื่องจากปริมาณเศษเมลามีนที่มากเกินไป ส่งผลให้ขนาดคละของมวลรวมที่ดีลดลง

4) การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีน ส่งผลให้ปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกากระหว่าง Na_2O และ K_2O กับมวลรวมทรายเป็นผล (ปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกาเป็นสาเหตุทำให้คอนกรีตขยายตัวและคอนกรีตแตกร้าว) ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น

อีกทั้งการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยส่งผลให้กำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ สามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลต่อไปนี้

1) การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ (ปริมาณ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF) ในคอนกรีตลดลง ทำให้ปฏิกิริยาของสารซีเมนต์ช้าลง กล่าวคือ การคายความร้อนจากปฏิกิริยาจะลดตัวออกไป ส่งผลให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง คอนกรีตจึงอยู่ในสภาพพลาสติกนานขึ้น ทำให้โพร่งของคอนกรีตมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มมากขึ้น

2) การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) กับซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ทำให้ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ซึ่งสารประกอบทั้งสองมีคุณสมบัติยึดประสาน อีกทั้งเถ้าลอยที่ใช้เป็นเถ้าลอย class C ซึ่งมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในปริมาณสูง (ร้อยละ 13.56) ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มมากขึ้น

3) เถ้าลอยที่มีรูปร่างกลมมนผิวเรียบและอนุภาคที่เล็ก ทำให้เกิดการกระจายตัวในซีเมนต์เพสต์ได้ดี ส่งผลให้การกระจายตัวของปูนซีเมนต์ดีขึ้นด้วย ทำให้ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตดีขึ้น ส่งผลให้โพรงในคอนกรีตลดลง อีกทั้งอนุภาคของเถ้าลอยยังสามารถเป็นตัวแทรกเข้าไปอุดช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างปูนซีเมนต์กับมวลรวมละเอียด ทำให้ซีเมนต์เพสต์แน่นขึ้น เป็นผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มมากขึ้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2553)

5.3 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีน ส่งผลให้การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีน ส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนรวมของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้น พร้อมทั้งเศษเมลามีนมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าทราย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเศษฝุ่นเมลามีนที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มมากขึ้น

5.4 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีน ส่งผลให้การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาปกติ เนื่องจากการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีน ทำให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของคอนกรีตมวลลดลง หรือกล่าวได้ว่าคอนกรีตมวลเบาแน่นขึ้น จึงส่งผลให้การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

5.5 ความพรุนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนและการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเป็นการเพิ่มปริมาณของซีเมนต์เพสต์ ส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนรวมในคอนกรีตมวลเบาเพิ่มมากขึ้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2553) และจากเหตุผลดังกล่าว การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนจึงส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากเศษเมลามีนมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่ามวลรวมละเอียดทราย

การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนและการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ส่งผลให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของคอนกรีตมวลลดลง เนื่องจาก การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตลดลง ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำชะลอดตัวออกไป ทำให้ผลิตผลไฮเดรชันมีเวลามากพอในการเข้าไปแทรกในช่องว่าง ส่งผลให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาเล็กลง (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2553) อีกทั้งการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนยังส่งผลให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของคอนกรีตมวลลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนทำให้ปริมาณทรายลดลง ส่งผลให้ปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิการะหว่าง Na_2O และ K_2O กับมวลรวมทรายเป็นลดลง (ปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกาเป็นสาเหตุทำให้คอนกรีตขยายตัวและคอนกรีตแตกร้าว) ส่งผลให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาเล็กลงเช่นเดียวกัน

5.6 โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

จากการผสมเศษเมลามีนในคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์พบว่า เศษเมลามีนมีการกระจายตัวในคอนกรีตมวลเบาได้ค่อนข้างดีทั่วทั้งผิวหน้าตัดเรียบ โดยเฉพาะเศษฝุ่นเมลามีนที่สามารถเข้ากันได้เป็นอย่างดีกับซีเมนต์เพสต์ ซึ่งดูได้จากความเป็นเนื้อเดียวของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีน อีกทั้งการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยยังทำให้ช่องว่างการยึดระหว่างซีเมนต์เพสต์กับเศษเมลามีนลดลง

5.7 การชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

การรีไซเคิลเศษเมลามีนโดยใช้แทนที่ทรายบางส่วนในคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ สามารถช่วยลดปริมาณการชะละลายโลหะหนักลงได้ โดยปริมาณการชะละลายโลหะหนักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนมีค่าไม่มากกว่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

5.8 ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า องค์ความรู้ที่ได้ในการศึกษาผลกระทบของเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส จะสามารถใช้เป็นแนวทางการรีไซเคิลเศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ โดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายบางส่วนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสนี้ หรือแม้กระทั่งใช้เป็นแนวทางการรีไซเคิลขยะพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงได้ และจากการศึกษางานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยแนะนำคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่สัดส่วนผสมรหัส MFG25D11 MFG25FA10D11 และ MFG25FA10D13 สำหรับงานก่อผนังทั่วไปแบบไม่รับแรง (ฉาบปิดผิว) ขณะที่สัดส่วนผสม MFP25D11 MFP25FA10D11 MFP25D13 และ MFP25FA10D13 สำหรับงานก่อผนังทั่วไปแบบไม่รับแรง (ไม่มีการฉาบปิดผิว)



รายการอ้างอิง

- คำภี จิตชัยภูมิ (2556). การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลเบา
เซลลูโลส ผสมเถ้าลอยซีโอไลท์ธรรมชาติและนาโนซิลิกา. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ชาญณรงค์ สายแก้ว (2557). สถิติและการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม. คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น. พิมพ์ครั้งที่ 3. 748 หน้า.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ (2553). เถ้าลอยในงานคอนกรีต. ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่าง
ยั่งยืน. พิมพ์ครั้งที่ 4. 110 หน้า.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2556). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต.
สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 7.
- สุชน เสถียรยานนท์ (2551). เมลามีน. ก้าวทันโลกวิทยาศาสตร์. ปีที่ 8(2): 57-64
- Akcaozoglu, S., Atis, C.D., and Akcaozoglu, K. (2010). **An investigation on the use of shredded
waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete.** Waste Management, vol.30(2):
February; pp.285-290.
- Albano, C., Camacho, N., Hernandez, M., Matheus, A., and Gutierrez, A. (2009). **Influence of
content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c
ratios.** Waste Management, vol.29(10): October; pp.2707-2716.
- Asokan, P., Osmani, M., and Price, A.D.F. (2010). **Improvement of the mechanical properties of
glass fibre reinforced plastic waste powder filled concrete.** Construction and Building
Materials, vol.24(4): April; pp.448-460.
- ASTM C33/C33M-13 (2013). **Standard Specification for Concrete Aggregates.** Annual Book
of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM C70-13 (2013). **Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregates.**
Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM C109/C109M-13 (2013). **Standard Test Method for Compressive Strength of
Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube specimens).** Annual Book
of ASTM Standards. Philadelphia.

- ASTM C128-12 (2012). **Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of fine Aggregates.** Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM C150/C150M-15 (2015). **Standard specification for portland cement.** Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM C495/C495M-12 (2012). **Standard Test Method for Compressive Strength of Lightweight Insulating Concrete.** Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM C567/C567M-14 (2014). **Standard Test Method for Determining Density of Structural Lightweight Concrete.** Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM C796/C796M (2012). **Standard specification for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam.** Annual Book of ASTM Standards. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM C618 (2015). **Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as in concrete.** Annual Book of ASTM Standards. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM D6489-99 (2012). **Standard Test Method for Determining the Water Absorption of Hardened Concrete Treated With a Water Repellent Coating.** Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM E11 (2015). **Standard specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves.** Annual Book of ASTM Standards. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- ASTM E1225-13 (2013). **Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids Using the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique.** Annual Book of ASTM Standards. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia.
- Batayneh, M., Marie, I., and Asi, I. (2007). **Use of selected waste materials in concrete mixes.** Waste Management, vol.27(12); pp.1870-1876.
- BS 882 (1992). **Specification for Aggregate from Natural Sources for concrete.** British Standard Institute, London.
- BS 1881 (1983). **Method for making test cubes from fresh concrete.** British Standard Institute, London.

- BS 3148 (1980). **Tests for water for Making Concrete (Including Notes on the Suitability of the Water)**. British Standard Institute, London.
- Choi, Y.W., Moon, D.J., Chung, J.S., and Cho, S.K. (2005). **Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete**. *Cement and Concrete Research*, vol.35(4): April; pp.776-781.
- Choi, Y.W., Moon, D.J., Kim, Y.J., and Lachemi, M. (2009). **Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles**. *Construction and Building Materials*, vol.23(8); August; pp.2829-2835.
- Donrak, J., Rachan, R., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., and Du, Y.J. (2016). **Improvement of marginal lateritic soil using melamine debris replacement for sustainable engineering fill materials**. *Journal of Cleaner Production: Green and Sustainable Innovation for Cleaner Production in the Asia-Pacific Region*, vol.134(B): October 15; pp.515-522.
- Dweik, H.S., Ziara, M. M., and Hadidoun, M.S. (2008). **Enhancing concrete strength and thermal insulation using thermoset plastic waste**. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, vol.57(7): May; pp.635-656.
- Fraj, A.B., Kismi, M., and Mounanga, P. (2010). **Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete**. *Construction and Building Materials*, vol.24(6): June; pp.1069-1077.
- Frigione, M. (2010). **Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete**. *Waste Management*, vol.30(6): June; pp.1101-1106.
- Hannawi, K., Kamali-Bernard, S., and Prince, W. (2010). **Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates**. *Waste Management: Sanitary Landfilling*, vol.30(11): November; pp.2312-2320.
- Ismail, Z.Z., and Al-Hashmi, E.A. (2008). **Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement**. *Waste Management*, vol.28(11): November; pp.2041-2047.
- Jitchaiyaphum, K., Sinsiri, T. and Chindapasirt, P. (2011). **Cellular Lightweight Concrete Containing Pozzolan Materials**. *The 12th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-12)*, vol.14: 26-28 January; pp. 1157-1164.

- Jones, M.R., and McCarthy, A. (2005). **Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete.** *Fuel*, vol.84(11): August; pp.1398-1409.
- Kan, A., and Demirboga, R. (2009). **A novel material for lightweight concrete production.** *Cement and Concrete Composites*, vol.31(7): August; pp.489-495.
- Kan, A., and Demirboga, R. (2009). **A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates.** *Journal of Materials Processing Technology*, vol.209(6): 19 March; pp.2994-3000.
- Kim, S.B., Yi, N.H., Kim, H.Y., Kim, J.H., and Song, Y.C. (2010). **Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete.** *Cement and Concrete Composites*, vol.32(3): March; pp.232-240.
- Kou, S.C., Lee, G. Poon, C.S., and Lai, W.L. (2009). **Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes.** *Waste Management*, vol.29(2): February; pp.232-240.
- Laukaitis, A., Zuraushas, R., and Kerien, J. (2005). **The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties.** *Cement & Concrete Composites*, vol.27(1): January; pp.41-47.
- Yazoghli-Marzouk, O., Dheilily, R.M., and Queneudec, M. (2007). **Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites.** *Waste Management*, vol.27(2); pp.310-318.
- Mounanga, P., Gbongbon, W., Poullain, P., and Turcry, P. (2008). **Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes.** *Cement and Concrete Composites*, vol.30(9): October; pp.806-814.
- Panyakapo, P., and Panyakapo, M. (2008). **Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete.** *Waste Management*, vol.28(9); pp.1581-1588.
- Powers, T.C., and Helmuth, R.A. (1953). **Theory of Volume Changes in Hardened Portland-Cement Paste During Freezing.** *Proceedings of the 32nd Annual Meeting of the Highway Research Board*, vol.32: 13-16 January; Washington, D.C.; pp.285-297.
- Rahman, M., Islam, A., Ahmed, M., and Salam, A. (2012). **Recycled Polymer Materials as Aggregates for Concrete and Blocks.** *Journal of Chemical Engineering*, vol.27(1): June; pp.53-57.

- Remadnia, A., Dheilily, R. M., Laidoudi, B., and Queneudec, M. (2009). **Use of animal proteins as foaming agent in cementitious concrete composites manufactured with recycled PET aggregates.** *Construction and Building Materials*, vol.23(10): October; pp.3118-3123.
- Saikia, N., and de Brito, J. (2014). **Mechanical properties and abrasion behavior of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate.** *Construction and Building Materials*, vol.52: 15 February; pp.236-244.
- Sengul, O., Azizi, S., Karaosmanoglu, F., and Tasdemir, M.A. 2011. **Effect of expanded perlite in the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete.** *Energy and Buildings*, vol. 43(2-3): February-March; pp.671-676.
- Silva, D.A., Betioli, A.M., Gleize, P.J.P., Roman, H.R., Gomez, L.A., and Ribeiro, J.L.D. (2005). **Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials.** *Cement and Concrete Research*, vol.35(9): September; pp.1741-1746.
- Visvanathan, C., and Trankler, J. (2004). **Municipal solid waste management in Asia: A Comparative Analysis.** Workshop on Sustainable Landfill Management, Chennai: India; pp.3-15.
- Yesilata, B., Isiker, Y., and Turgut, P. (2009). **Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces.** *Construction and Building Materials*, vol.23(5): May; pp.1878-1882.



ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Chaitongrat, C., and Siwadumrongpong, S. (2015). **Recycling of melamine formaldehyde waste in lightweight concrete as aggregate replacement.** The 9th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium. 27-30 July 2015, Nakorn Ratchasima, Thailand.

Chaitongrat, C., and Siwadumrongpong, S. (2015). **Recycling of melamine Waste as aggregate in lightweight concrete.** The 29th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand. 30 June-2 July 2015, Nakorn Ratchasima, Thailand.

Chaitongrat, C., and Siwadumrongpong, S. (Accepted). **Recycling of melamine formaldehyde waste as fine aggregate in lightweight concrete.** Songklanakarin Journal of Science and Technology, Vol. 40 No. 1 (January-February, 2018).



OS Number 06012

RECYCLING OF MELAMINE FORMALDEHYDE WASTE IN LIGHTWEIGHT CONCRETE AS AGGREGATE REPLACEMENT

Chalermchai Chaitongrat^{*1}, and Somsak Siwadamrongpong²
¹⁾ School of Mechanical Engineering, ²⁾ School of Manufacturing Engineering
 Suranaree University of Technology, Thailand

ABSTRACT

This paper presented the study results of the utilization of melamine formaldehyde (MF) waste in the production of lightweight concrete. This MF waste was used for partially replacing river sand. Investigation was carried out on two different forms of MF waste for mortar samples, one made with MF waste granules and, second made with MF waste powder, in which river sand was partially replaced by MF wastes in percentages of 0%, 15%, 25% and 35% by volume, constant water-to-cement ratio of 0.50 and unit weight of 1,000 kg/m³. From the studies, it was found that the lightweight concrete contained MF waste was slightly variance density, the compressive strength and water absorption were increased and the thermal conductivity was not significantly different. The results gathered would form a part of useful information for recycling MF waste in lightweight concrete mixes.

Keyword: Recycling, Melamine formaldehyde waste, Fine aggregate, Lightweight concrete, Replacement.

1. INTRODUCTION

Plastic, one of the most significant innovations of 20th century, is ubiquitous material. A substantial growth in the consumption of plastic is observed all over the world in recent years, which also increases the production of plastic-related waste. The plastic is now a serious environmental threat to modern civilization. Plastic is composed of several toxic chemicals, and therefore plastic pollutes soil, air and water.

Plastics can be divided into two types. The first type is thermoplastic, which can be melted for recycling in the plastic industry. The second type is thermosetting plastic. This plastic cannot be melted by heating because the molecular chains are bounded firmly with meshed crosslinks. At present, these plastic wastes are disposed by either burning or burying. However, these processes are costly. If the thermosetting plastic wastes can be reused, the pollution that is caused by the burning process as well

as the cost of these waste management process can be reduced.

Land-filling of plastic is also dangerous due to its slow degradation rate (more than a hundred years) and bulky nature. The waste mass may hinder the ground water flow and can also block the movement of roots. Plastic wastes also contains various toxic elements especially cadmium and lead, which can mix with rain water and pollute soil and water.

Recycling plastics is a possible alternative. As aggregate is application into construction materials has been conducted, particularly for the concrete wall in buildings (Rebeiz, 1996; Soroushian, 1999; Choi et al., 2005; Batayneh et al., 2007). In Thailand, lightweight concrete is extensively used for the construction of interior and exterior walls of building for the case where the walls are not designed for lateral loads. This is due to the special characteristics of lightweight concrete. Lightweight concrete can be produced by introducing: (i) gassing agents such as aluminum powder or foaming agents, (ii) lightweight mineral aggregate such as perlite, pumice, expanded shale, slate, and clay, or (iii) plastic granules as aggregate, e.g., expanded polystyrene foam (EPS), polyurethane or other polymer materials. Recycling of plastic waste to produce new materials, such as cement composites, appears as one of the best solution for disposing of plastic waste, due to its economic and ecological advantages and recycling MF wastes to river sand for concrete production can be one of the environmentally friendly methods.

Therefore in this study, melamine formaldehyde wastes have been recycled for use as fine aggregate for partially replacing river sand in lightweight concrete. This study has investigated the properties of concrete using MF waste, conducting tests which analyze density and mechanical properties to achieve this purpose; a study of these MF wastes for application into construction materials has been conducted, particularly for the concrete wall in buildings.

2. EXPERIMENT

2.1 Materials

2.1.1 Cement

The cement used in this study is Portland cement type 1 as per ASTM C150-12. Its density is 412 kg/m³. The chemical composition of cement is given in Table 1.

Table 1 Chemical composition of cement

Components	Mass%
Calcium oxide (CaO)	66.33
Silica (SiO ₂)	18.60
Ferric oxide (Fe ₂ O ₃)	4.03
Alumina (Al ₂ O ₃)	3.77
Sulphuric anhydride (SO ₃)	2.67
Magnesium oxide (MgO)	2.13
Sodium oxide (Na ₂ O)	1.39
Potassium oxide (K ₂ O)	0.46
Loss on ignition	-

2.1.2 Sand

River sand was used as the fine aggregate in the concrete mixes with 1.97 fineness modules (FM) 2.52 specific gravity and 0.33% water absorption are given in Table 2. Its particle size distribution, obtained fine aggregate according to ASTM C33-13, is provided on Fig. 1.

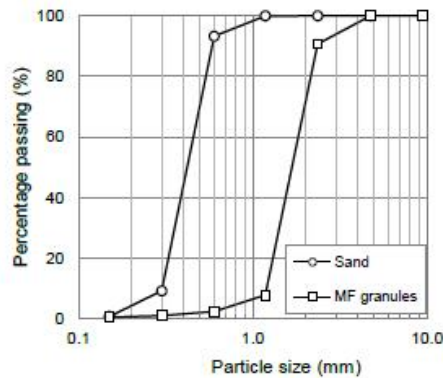


Fig. 1 Gradation of sand and MF granules.

2.1.3 MF wastes

Melamine formaldehyde wastes come from the flash on melamine products in activities industry. They were provided by a manufacturer of Srithai super ware public company limited, in two different forms of MF wastes: a form containing "scrap" waste was produced by shaving flash of melamine products and a form containing "powder" waste was produced by flattening edge of melamine products (Fig. 2a and 3). And both two forms are studied here. Only the first form ("scrap" waste) was granulated by grinding machine to small granules (Fig 2b). The MF waste granules was separated under sieve no. 8 with 3.98 fineness modules (see Fig. 1) 1.50 specific gravity and 5.51% water absorption (see Table 2). On the other hand the MF waste powder was separated under sieve no. 140 to removal of grime particles. Its

mean and standard deviation of particle size are 34 and 29 micrometer (see Fig. 4), respectively. These MF wastes were used to replace a fraction of river sand in the concrete mixtures (by volume).

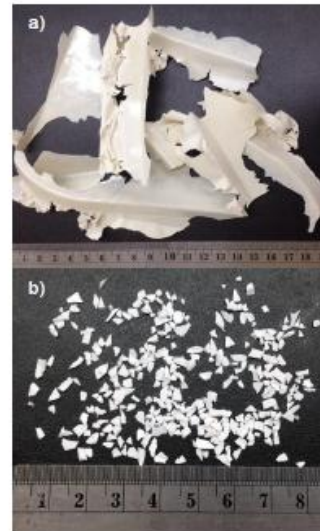


Fig. 2 Recycled MF waste (a: before ; b: after crushing).



Fig. 3 MF wastes powder.

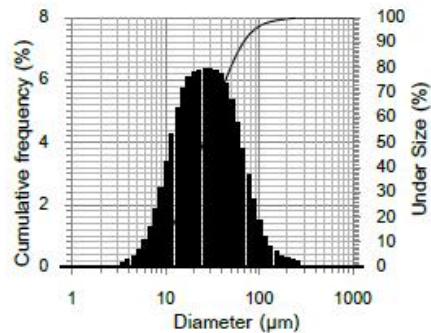


Fig. 4 Particle size of MF waste powders.

Table 2 Physical and mechanical properties of lightweight aggregate (LWA) and MF wastes

Aggregate	Shape	FM/particle size*	Specific gravity	Water absorption
Sand	Round and smooth	1.97	2.52	0.33
MF waste granules	Flaky and rough	3.98	1.50	5.51
MF waste powders	powder	*34 micron	1.50	-

Table 3 Methods of testing properties

Properties	Detail of test	Specification
Wet density	The wet density of concrete was determined by measuring the mass and volume of fresh concrete	ASTM C138-14
Compressive strength	The 50 x 50 x 50 mm cubic specimens were used to determine the compressive strength of concrete at the concrete ages of 3, 7, 14, 28 and 60 days. A "ELE" compression machine with a loading capacity of 200 kN was used for the experiment	ASTM C109-13
Water absorption	The The 50 x 50 x 50 mm cubic specimens were used to determine the water absorption (W_a) by measuring $W_a = ((M_{sat,air} - M_d) / M_d)$ of concrete at the concrete ages of 28 and 60 days.	ASTM D6489-12
Thermal conductivity	The 65 x Ø69 mm cylinder specimens were used to determine the thermal conductivity of concrete at the concrete ages of 28 and 60 days.	ASTM E1225-13

2.1.3 Foaming agent

The foaming agent was diluted with water in ratio of 1:40 by weight, and then aerating to a density of 50 kg/m³. Water and liquid chemical creates many small air bubbles in the cement paste. The sizes of air bubbles are in the range of 0.1-1.0 mm. these small air bubbles, which are entrained in the mass of concrete, cause an expansion of concrete mass. Thus the foaming agent was used to density controlled of concrete mixes. This type of lightweight concrete is then called cellular lightweight concrete (CLC).

2.2 Sample preparation

The concrete mixtures were prepared in the laboratory. The design characteristic compressive strength by Chandra and Bertsson (2003) at day 28 and 60 of control specimen (i.e., MF0) without MF wastes. The concrete mixtures were prepared with a cement content of 412 kg/m³ and water-to-cement ratio of 0.50. The proportion of river sand was designed at 412 kg/m³. The MF wastes were used to replace 0%, 15%, 25% and 35% by volume of sand in the four mixes. The mix proportions of the concrete are shown in Table 4 and 5.

The wet density of the concrete mixtures was determined before casting the concrete in molds. For each concrete mixture, 20 numbers of 50 x 50 x 50 mm cube specimens were cast for the determination of the compressive strength, 2 numbers of 65 mm high x 69 mm diameter cylindrical specimens were cast for the determination of the thermal conductivity and two numbers of 50 x 50 x 50 mm cube specimens were prepared for measuring the water absorption. After 24 h. casting, all the specimens were then de-molded and immediately covered with plastic sheets before being air-cured in the laboratory at room temperature and dry curing until the ages of testing.

Table 4 Mix proportions of concrete mixtures

Mix code	MF0	MF15	MF25	MF35
Replacement (%)	0	15	25	35
Cement (kg/m ³)	412	412	412	412
Sand (kg/m ³)	412	350	309	267
MF (kg/m ³)	0	62	103	144
Water (kg/m ³)	206	206	206	206

Table 5 Code of concrete mixtures

Code	MF waste form
Mix I	MF waste granules
Mix II	MF waste powders

Table 6 Specification of non-load-bearing lightweight concrete (ASTM C129)

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

2.3 Test methods

The test method and the associated specifications for determining the properties are reported in Table 3. Each of the tested values reported in Section 3 is the averaged results.

3. RESULTS and DISCUSSION

3.1 Density

The dry densities of the different concrete mixtures are reported in Fig. 5. The results show that the density of the control concrete (MF0) was changeless from wet density control (1000 kg/m³). On the other hand values of dry density slightly variance from wet density for mixtures containing of MF wastes aggregate when compared with river sand. Due to the water absorption of MF wastes higher than sand result to the difficulty control dry density.

3.2 Compressive strength

The results of compressive strength of the concrete are presented in Table 7. It can be seen that at all test ages, the compressive strength were increased with the increase in MF wastes content and it was also found that the compressive strength of concrete contain MF waste powder showed the highest at 25% MF wastes content. The ratios of 28 and 60 days compressive strength values of the concrete mixes prepared with MF waste replacement to that of the control (MF0) are shown in Fig. 6.

This strength increasing can be explained by the following reasons:

- (1) A combination of the two aggregate (sand and MF waste) has resulted in a better gradation which contributed to increased compressive strength.
- (2) Angular particles with rough surface texture provide more surfaces and thus result in increased bond strength between the MF wastes and cement paste.
- (3) The bond is characterized by the presence of a thin layer which bridges the aggregate with paste. This layer is formed as a result of a chemical reaction between the cement paste and aggregate.

3.3 Comparison between the test results and standards

Based on the above results, the optimum proportions of MF wastes powder is 25%. The results of compressive strength and dry density, which are 4.24 MPa and 1089 kg/m³ respectively, are comparable to the specifications for non-load-bearing lightweight concrete according to ASTM C129-11 Type II standard, as shown in Table 6. It was found that the compressive strength and water absorption of MF wastes lightweight concrete is close to the class 2 of for non-load-bearing lightweight concrete (ASTM C129-11).

3.4 Water absorption

Water absorption values of different mixtures are given in Fig. 7. The experimental results reveal that the water absorption was increased with increase in MF wastes content. However, for higher content, water absorption seems to increase with MF waste content.

3.5 Thermal conductivity

The results of thermal conductivity of the concrete are presented in Fig.8. The experimental results reveal that at all replacing (in volume) of sand by MF wastes do not exert a significant influence on thermal conductivity of the concrete in comparison with the control concrete (MF0).

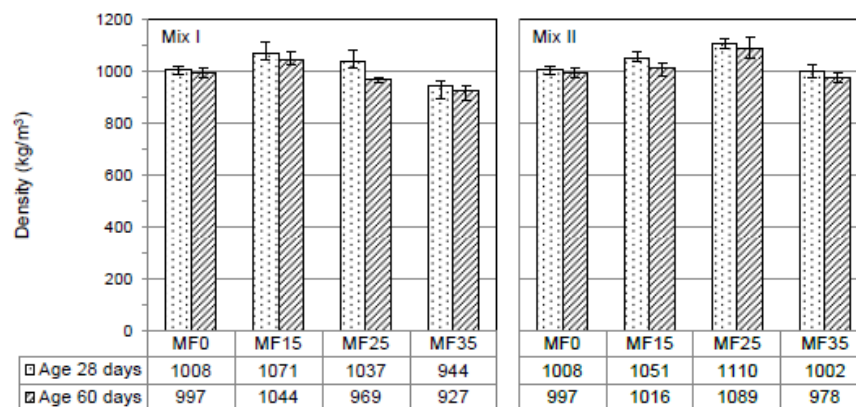


Fig. 5 Density of concrete mixtures.

Table 7 Compressive strength of concrete mixtures

Code	Mix code	Sand content (kg/m ³)	MF content (kg/m ³)	Compressive strength (MPa)				
				3 days	7 days	14 days	28 days	60 days
Mix I	MF0	412	0	0.95	1.15	1.21	1.21	1.49
	MF15	350	62	1.03	1.44	1.48	2.17	2.29
	MF25	309	103	1.11	1.79	2.00	2.09	2.41
	MF35	267	144	0.84	1.30	1.32	1.74	1.89
Mix II	MF0	412	0	0.95	1.15	1.21	1.21	1.49
	MF15	350	62	1.33	1.62	2.05	2.16	2.18
	MF25	309	103	2.35	2.69	2.71	3.71	4.24
	MF35	267	144	1.25	1.59	1.92	2.20	2.40

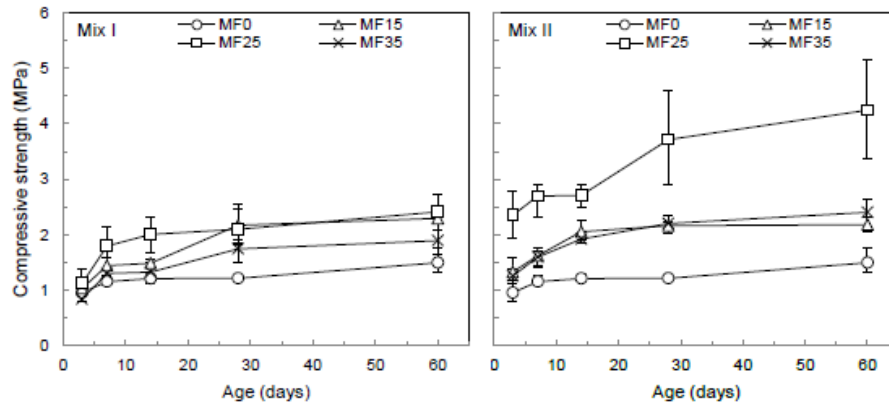


Fig. 6 Compressive strength of concrete mixtures.

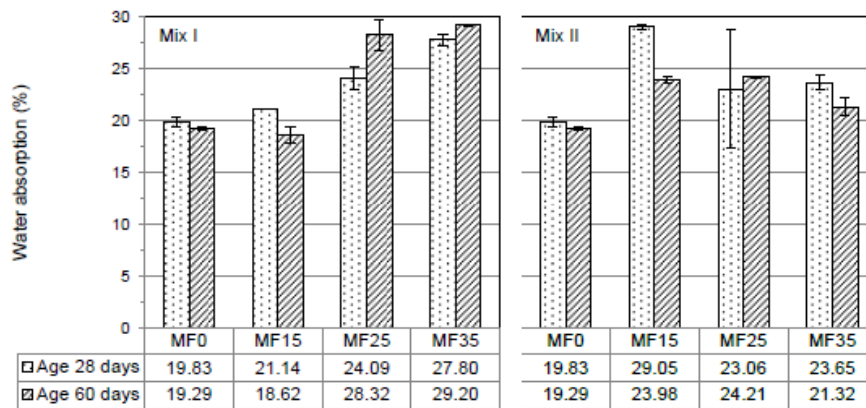


Fig. 7 Water absorption of concrete mixtures.

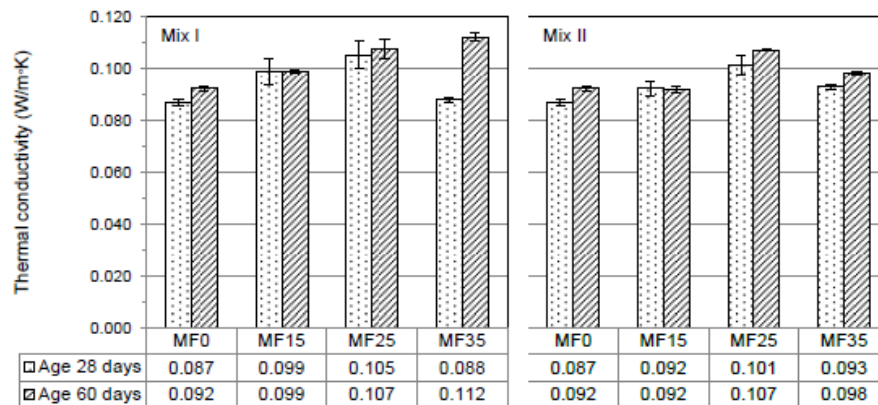


Fig. 8 Thermal conductivity of concrete mixtures.

4. CONCLUSION

This paper presented the results of a systematic study on the effect of incorporating MF wastes on the properties of lightweight concrete. The following conclusion can be drawn:

With an increase of replacement ration of river sand by MF wastes:

1. The dry density was slightly variance.
2. The compressive strength was increased.
3. The water absorption was increased.
4. The thermal conductivity was significantly not different.

The results of the study would form a part of useful information for recycling scrapped MF wastes in lightweight concrete mixes. The results show that the MF waste powder derived from flatting edge of melamine products has potential to be used as aggregates to replace sand for making non-load-bearing lightweight aggregate concrete. The optimal replacement percentage should be within 25% by volume.

REFERENCES

- Batayneh, M., Iqbal, M., Ibrahim, A., 2007. Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management* 27 (12), 1870-1876.
- Chandra, S., Berntsson, L., 2003. *Lightweight aggregate concrete*. Noyes Publication, Norwich, N.J.
- 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, 776-781.
- Marzouk, O.Y., Dheilily, R.M., Queneudec, M., 2007. Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Management* 27, 310-318.
- Phaiboon P., Mallika P., 2007. Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete. *Waste Management* 28, 1581-1588.
- Rebeiz, K.S., 1996. Precast use of polymer concrete using unsaturated polyester resin based on recycled PET waste. *Construction and Building Materials* 10 (3), 215-220.
- Soroushian, C., 1999. Experimental investigation of the optimized use of plastic flakes in normal-weight concrete. *Magazine of Concrete Research* (February), 27-33.

AMM-08

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29
30 มิถุนายน-2 กรกฎาคม 2558 จังหวัดนครราชสีมา



การรีไซเคิลเศษเมลามีนโดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมในคอนกรีตมวลเบา Recycling of Melamine Waste as Aggregate in Lightweight Concrete

เฉลิมชัย ไชยณรงค์^{1*} และ สมศักดิ์ ศิวสารพงษ์²

¹ สำนักวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

² สำนักวิชาวิศวกรรมกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

*ติดต่อ: ton-phai@hotmail.com, 087-2432909

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาเสนอผลการศึกษากการใช้ประโยชน์จากเศษเมลามีนโดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในคอนกรีตมวลเบา เศษเมลามีนดังกล่าวถูกใช้แทนที่ทรายแม่น้ำบางส่วน โดยดำเนินการตรวจสอบชั้นทดสอบผสมเศษเมลามีนที่แตกต่างกัน 2 แบบ แบบแรกเป็นชั้นทดสอบผสมเศษเม็ดเมลามีนและแบบที่สองเป็นชั้นทดสอบผสมเศษฝุ่นเมลามีน โดยอัตราส่วนการแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเศษเมลามีนโดยน้ำหนักที่ร้อยละ 0, 15, 25 และ 35 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.50 และค่าหน่วยน้ำหนักที่ 1,300 กก./ม.³ จากการศึกษาพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีค่าความหนาแน่นแปรปรวนจากที่กำหนดเล็กน้อย ค่าลึกรับแรงอัดเพิ่มขึ้น การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น และไม่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ ผลการรวบรวมจะเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับการรีไซเคิลเศษเมลามีนในการผสมคอนกรีตมวลเบา

คำหลัก: การรีไซเคิล, เศษเมลามีน, วัสดุมวลรวมละเอียด, คอนกรีตมวลเบา, สมบัติเชิงกล

Abstract

This paper presented the study results of the utilization of melamine waste in the production of lightweight concrete. This melamine waste was used for partially replacing river sand. Investigation was carried out on two different forms of melamine wastes for mortar samples, one made with melamine waste granules and, second made with melamine waste powders, in which river sand was partially replaced by melamine wastes in percentages of 0%, 15%, 25% and 35% by volume, constant water-to-cement ratio of 0.50 and unit weight of 1,000 and 1,300 kg/m³. From the studies, it was found that the lightweight concrete contained melamine waste was slightly variance density, the compressive strength and water absorption were increased and the thermal conductivity was not significantly different. The results gathered would form a part of useful information for recycling melamine waste in lightweight concrete mixes.

Keywords: Recycling, Melamine Waste, Fine aggregate, Lightweight Concrete, Mechanical Properties.

1. บทนำ

จากการใช้งานของพลาสติกที่มีการเติบโตอย่างรวดเร็วในปีที่ผ่านมา ส่งผลให้เกิดขยะพลาสติกจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขยะพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติง ซึ่งวิธีการกำจัดขยะพลาสติกประเภทนี้เป็นไปได้ยาก เนื่องจากไม่สามารถหลอมละลายโดยการให้ความร้อนได้อีกเมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้ว [1]

หนึ่งในวิธีการกำจัดขยะพลาสติกประเภทนี้คือวิธีการฝังกลบ [2] การฝังกลบขยะพลาสติกเป็นวิธีที่อันตรายเนื่องจากอัตราการย่อยสลายช้า อีกทั้งขยะพลาสติกอาจขัดขวางการไหลของน้ำ ทำให้อัตราการแทรกซึมของน้ำฝนลดลง ส่งผลให้ความอุดมสมบูรณ์ของดินเสื่อมสภาพลงและยังสามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของรากต้นไม้ นอกจากนี้ขยะพลาสติกยังมีองค์ประกอบที่เป็นพิษต่าง ๆ

AMM-08

โดยเฉพาะอย่างยิ่งแคลเซียมและตะกั่ว ซึ่งสามารถผสมกับน้ำฝนและก่อให้เกิดมลพิษในดินและน้ำใต้ ในขณะที่ขยะพลาสติกที่ไหลลงแม่น้ำ ลำธารหรือทะเล จะทำให้น้ำปนเปื้อน ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตทางทะเลหรือสัตว์น้ำใต้ โดยสัตว์น้ำเหล่านั้นจะกลืนกินขยะพลาสติกเข้าไป ซึ่งขยะพลาสติกเหล่านั้นสามารถทำลายสุขภาพของสัตว์น้ำได้ สังเกตได้จากอาการพบขยะพลาสติกในท้องหรือกล้ามเนื้อของสัตว์น้ำเหล่านั้น อีกทั้งวิธีการฝังกลบยังเป็นวิธีการที่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ซึ่งหากเราสามารถนำขยะพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติงกลับมาใช้ใหม่ได้ เราจะสามารถลดมลพิษที่เกิดจากการฝังกลบขยะพลาสติก รวมทั้งยังสามารถลดค่าใช้จ่ายที่ใช้ไปในกระบวนการฝังกลบได้

การใช้เซลล์ขยะพลาสติกจึงเป็นทางเลือกที่เป็นไปได้ที่สามารถกำจัดขยะพลาสติกโดยใช้เป็นวัสดุผสมในวัสดุก่อสร้าง [3], [4], [5], [6] โดยเฉพาะอย่างยิ่งผนังคอนกรีตในงานก่อสร้าง ซึ่งในประเทศไทย คอนกรีตมวลเบามีการใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับงานก่อสร้าง ทั้งใช้เป็นส่วนภายในและภายนอก ซึ่งการใช้เซลล์ขยะพลาสติกในวิธีการนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ คือ ซีเมนต์คอมโพสิต ซึ่งวิธีการนี้เป็นหนึ่งในการแก้ปัญหาที่ดี สำหรับการกำจัดขยะพลาสติก เนื่องจากข้อได้เปรียบทางเศรษฐศาสตร์และนิเวศวิทยา

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของบทความนี้เพื่อ การใช้เซลล์เศษเมลามีนจากกระบวนการผลิตภาชนะเมลามีน โดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายของคอนกรีตมวลเบา และประเมินคุณภาพของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเศษเมลามีนเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาเชิงการค้า ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้

2.1.1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

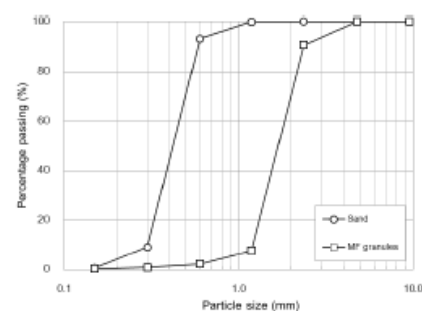
ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาค้างครั้งนี้คือ ปูนซีเมนต์ตราช้าง (ประเทศไทย) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานของสมาคมทดสอบวัสดุอเมริกา ASTM C150-12 โดยมีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 412 กก./ม.³ และองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

องค์ประกอบเคมี	ร้อยละโดยมวล
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	66.33
ซิลิกา (SiO ₂)	18.60
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	4.03
อลูมินา (Al ₂ O ₃)	3.77
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	2.67
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	2.13
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	1.39
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.46
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on ignition)	-

2.1.2. ทราย

ทรายที่ใช้ในการศึกษาค้างครั้งนี้เป็นทรายแม่น้ำที่ร่อนผ่านร่อนเบอร์ 8 มีลักษณะรูปร่างแบบมวลรวมมน (rounded aggregate) ตามมาตรฐานอังกฤษ BS 812 มีขนาดคละดังแสดงในรูปที่ 1 ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus: FM) มีค่าเท่ากับ 1.97 ตามมาตรฐาน ASTM C33-13 ค่าความตวงจำเพาะเท่ากับ 2.52 และค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 0.33 ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 1 ขนาดคละของทรายและเศษเมลามีน

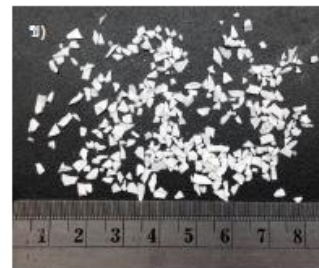
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29
30 มิถุนายน-2 กรกฎาคม 2558 จังหวัดนครราชสีมา



AMM-08

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพและทางกลของมวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียด	รูปร่าง	โมดูลัสความละเอียด/ขนาดอนุภาคเฉลี่ย*	ความต่างจำเพาะ	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
ทราย	ก้อนมน	1.97	2.52	0.33
เศษเม็ดเมลามีน	ก้อนแบน	3.98	1.50	5.51
เศษฝุ่นเมลามีน	ผงฝุ่น	*34 ไมโครเมตร	1.50	-



รูปที่ 2 (ก) เศษครีบเมลามีน (ข) เศษครีบเมลามีนที่ผ่านการบดย่อย

2.1.3. เศษเมลามีน

เศษเมลามีนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นเศษเมลามีนที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนของบริษัทศรีไทยซูเปอร์แวร์จำกัด (มหาชน) โดยเศษเมลามีนที่ได้มีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันสองรูปแบบคือ 1) เศษครีบเมลามีน "หยาบ" เป็นเศษเมลามีนที่ได้จากบริเวณส่วนเกินของขอบผลิตภัณฑ์เมลามีนในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน 2) เศษฝุ่นเมลามีน "ละเอียด" เป็นเศษเมลามีนที่ได้จากกระบวนการเจียรขัดตกแต่งขอบของผลิตภัณฑ์เมลามีนดังแสดงในรูปที่ 2(ก) และ 3 ตามลำดับ



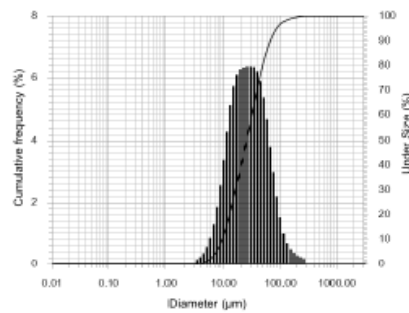
รูปที่ 3 เศษฝุ่นเมลามีน

สำหรับเศษครีบเมลามีนจะถูกนำมาบดด้วยเครื่องบดย่อยพลาสติก ยี่ห้อ MGK รุ่น 2121R แล้วนำมาร่อนผ่านร่อนเบอร์ 8 โดยมีขนาดผลเฉลยแสดงในรูปที่ 1 มีค่าโมดูลัสความละเอียดมีค่าเท่ากับ 3.98 ค่าความต่างจำเพาะเท่ากับ 1.50 และค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 5.51 ดังแสดงในตารางที่ 2 เศษเม็ดเมลามีนที่ได้จากกระบวนการบดย่อยนี้มีรูปร่างเป็นแบบมวลรวมก้อนแบน (flaky aggregate) ผิวเรียบดังแสดงในรูปที่ 2(ข)

สำหรับเศษฝุ่นเมลามีนที่ได้จากกระบวนการเจียรขัดตกแต่งขอบของผลิตภัณฑ์เมลามีนจะถูกนำมาร่อนผ่านร่อนเบอร์ 140 เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่ติดมากับเศษฝุ่นเมลามีน โดยลักษณะรูปร่างเป็นแบบผงฝุ่นละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3 โดยขนาดอนุภาคของเศษฝุ่นเมลามีนมีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 34 และ 29 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4

เศษเมลามีนทั้งสองรูปแบบนี้จะถูกนำมาทำไรโซลิต โดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ (Cellular Lightweight Concrete: CLC) โดยอัตราส่วนการแทนที่ทรายแม่น้ำด้วยเศษเมลามีนโดยน้ำหนักร้อยละ 0, 15, 25 และ 35

AMM-08



รูปที่ 4 ขนาดอนุภาคของเศษฝุ่นเมลามีน

2.1.4. สารก่อฟอง

สารก่อฟองที่ใช้เป็นชนิดสังเคราะห์ โดยสารก่อฟองดังกล่าวจะถูกนำมาเจือจางกับน้ำในอัตราส่วน 1:40 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำให้เป็นฟองโฟมด้วยเครื่องสร้างโฟมที่ต่อเข้ากับเครื่องอัดอากาศที่ความดัน 5.0 บาร์ เพื่อให้ได้โฟมที่มีฟองอากาศขนาดเล็กตั้งแต่ 0.1-1.0 มม. ซึ่งความหนาแน่นของโฟมประมาณ 50 กก./ม.³ ก่อนนำไปผสมกับคอนกรีตสด

2.2. การเตรียมชิ้นทดสอบ

การศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการเตรียมชิ้นทดสอบในห้องปฏิบัติการ [7] โดยใช้ชิ้นทดสอบจำนวน 5 ชิ้น ในแต่ละเงื่อนไขของการทดสอบกำลังรับแรงอัด 2 ชั้น ในแต่ละเงื่อนไขของการทดสอบการดูดซึมน้ำและการนำความร้อน สำหรับการออกแบบการทดสอบของคอนกรีตมวลเบาในครั้งนี้ ที่อัตราส่วนของซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1:1 และอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 การแทนทรายด้วยเศษเมลามีนในสัดส่วนร้อยละ 0, 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักของทราย สัดส่วนการผสมคอนกรีตมวลเบาทั้งสี่แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สัดส่วนการผสมคอนกรีต

สัญลักษณ์	M0	M15	M25	M35
การแทนที่ (ร้อยละ)	0	15	25	35
ซีเมนต์ (กก./ม. ³)	412	412	412	412
ทราย (กก./ม. ³)	412	350	309	267
เมลามีน (กก./ม. ³)	0	62	103	144
น้ำ (กก./ม. ³)	206	206	206	206

ความหนาแน่นของคอนกรีตสดก่อนเทลงแบบของการศึกษาครั้งนี้ มีค่าเท่ากับ 1,300 กก./ม.³ สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับการผสมคอนกรีตในการศึกษาครั้งนี้ ดังแสดงในตารางที่ 4 แบบหล่อมาตรฐานสำหรับเตรียมชิ้นทดสอบกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำ รูปลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มม. จำนวน 60 ชิ้น ทำจากทองเหลืองผิวเรียบและแบบหล่อสำหรับเตรียมชิ้นทดสอบการนำความร้อน รูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 69 มม. สูง 65 มม. จำนวน 4 ชิ้น ทำจากท่อพีวีซีที่มีความแข็งแรงผิวด้านในเรียบ ภายหลังจากการเทลงแบบหล่อจะทำการกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งอย่างน้อย 35 ครั้ง เพื่อให้คอนกรีตเต็มแบบหล่อ ภายหลังจากการกระทุ้ง 1 ชั่วโมง จึงทำการปิดผิวหน้าของคอนกรีตให้เรียบ แล้วทิ้งคอนกรีตไว้ 24±4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องจึงถอดแบบและนำไปปมแห้งโดยการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกที่อายุปม 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มาตรฐานเลขที่ มอก. 2601-2556 ดังแสดงในตารางที่ 5

2.3. วิธีการทดสอบ

วิธีการทดสอบและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งค่าจากการทดสอบดังแสดงในส่วนของผลการทดสอบ ได้จากค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบแต่ละเงื่อนไข

ตารางที่ 4 สัญลักษณ์สำหรับการผสมคอนกรีต

สัญลักษณ์	รูปแบบเศษเมลามีน	ความหนาแน่น (กก./ม. ³)
Mix I	เศษเม็ด	1,300
Mix II	เศษฝุ่น	1,300

ตารางที่ 5 ชนิดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา (มอก. 2601)

ชนิด	ความหนาแน่น (กก./ม. ³)	ต้านแรงอัด (MPa)	ดูดซึมน้ำ (%)
C8	701-800	2.0	25
C9	801-900		
C10	901-1000	2.5	23
C12	1001-1200		
C14	1201-1400	5.0	20

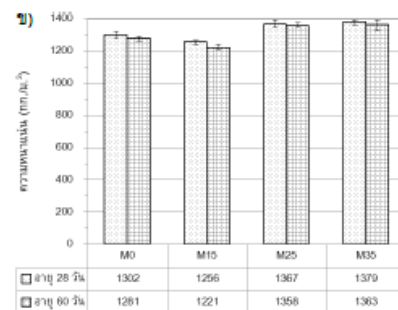
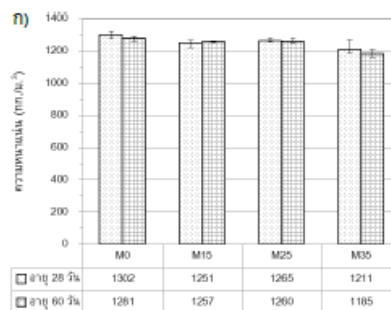
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29
30 มิถุนายน-2 กรกฎาคม 2558 จังหวัดนครราชสีมา



AMM-08

ตารางที่ 6 วิธีการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

คุณสมบัติของคอนกรีต	รายละเอียดของการทดสอบ	มาตรฐาน
ความหนาแน่น	ความหนาแน่นของคอนกรีตหาได้โดยตรงจากมวลและปริมาตรของคอนกรีตมวลเบาสดที่บรรจุเต็มในภาชนะทรงกระบอกและคอนกรีตมวลเบาที่แข็งตัวแล้วรูปลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มม.	ASTM C138-14
กำลังรับแรงอัด	คอนกรีตรูปลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มม. ถูกนำมาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุปม 3, 7, 14, 28 และ 60 ด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด รุ่น ELE กำลังสูงสุด 200 ตัน	ASTM C109-13
การดูดซึมน้ำ	คอนกรีตรูปลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มม. ถูกนำมาทำการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่อายุปม 28 และ 60 ซึ่งหาได้โดยตรงจาก ค่าการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ) = (น.น.เปียก-น.น.แห้ง)/น.น.แห้ง	ASTM D6489-12
การนำความร้อน	คอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 69 มม. สูง 65 มม. ถูกนำมาทำการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 60	ASTM E1225-13



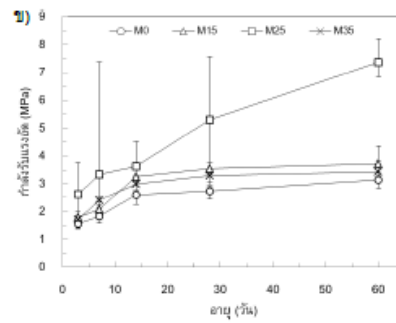
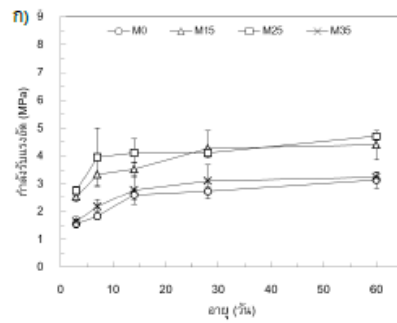
รูปที่ 5 ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่แข็งตัวแล้ว (ก) Mix I (ข) Mix II

ตารางที่ 7 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน

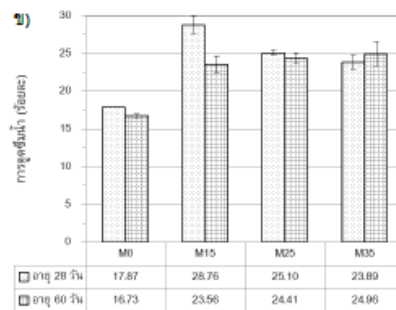
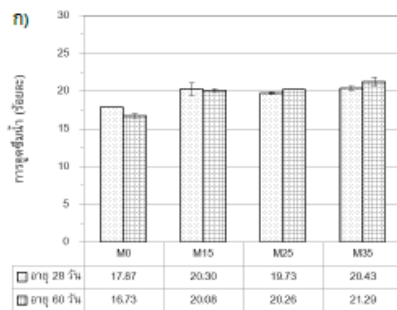
สัญลักษณ์	ปริมาณทราย (กก./ม ³)	ปริมาณเมลามีน (กก./ม ³)	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคัล)					
			3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	
Mix I	M0	412	0	1.58	1.83	2.61	2.74	3.14
	M15	350	62	2.53	3.34	3.53	4.26	4.40
	M25	309	103	2.76	3.95	4.11	4.12	4.70
	M35	267	144	1.63	2.17	2.78	3.11	3.24
Mix II	M0	412	0	1.58	1.83	2.61	2.74	3.14
	M15	350	62	1.79	2.09	3.27	3.54	3.73
	M25	309	103	2.62	3.34	3.63	5.31	7.37
	M35	267	144	1.72	2.42	2.99	3.30	3.44



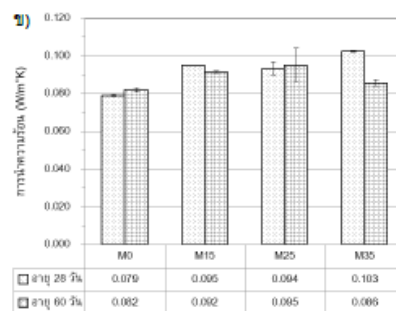
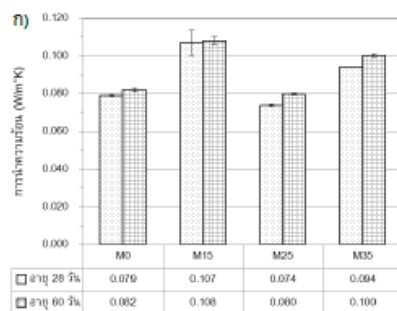
AMM-08



รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา (ก) Mix I (ข) Mix II



รูปที่ 7 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา (ก) Mix I (ข) Mix II



รูปที่ 8 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา (ก) Mix I (ข) Mix II

AMM-08

3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

3.1. ความหนาแน่น

ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบา ดังแสดงในรูปที่ 5 ได้จากค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ 5 ซีนทดสอบ ในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบ

จากการกำหนดความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาสดที่ 1,300 กก./ม.³ พบว่า ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาควบคุม (MO) ที่แข็งตัวแล้วมีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่กำหนดมากกว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน จากเศษเมลามีนมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าทรายมา ทำให้น้ำที่ใช้สำหรับการผสมคอนกรีตมวลเบาสูญเสียไปเนื่องจากการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีน ส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่แข็งตัวแล้วมีความแตกต่างไปจากความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาสดที่กำหนดไว้เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 5 และยังพบว่า ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่อายุปม 60 วัน ยังมีค่าลดลงอีกเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาที่อายุปม 28 วัน เนื่องจากการระเหยของน้ำตามธรรมชาติในคอนกรีต

จากมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มาตรฐานเลขที่ มอก. 2601-2556 ดังแสดงในตารางที่ 5 ได้กำหนดความหนาแน่นเชิงปริมาตรของคอนกรีตบล็อกมวลเบาชนิด C14 ต้องมีความหนาแน่นในช่วง 1,201-1,400 กก./ม.³ พบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเมลามีนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานดังกล่าว ยกเว้นแต่คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนที่ร้อยละ 35 (M35) (Mix I) ที่อายุปม 60 วัน มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์เล็กน้อย โดยมีความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1,185 กก./ม.³ ดังแสดงในรูปที่ 5

3.2. กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา ดังแสดงในตารางที่ 7 ได้จากค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ 5 ซีนทดสอบ ในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบ

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า คอนกรีตมวลเบาจะพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องกับน้ำ กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงแรกภายหลังจากการแข็งตัว แต่หลังจากอายุ 28 วัน กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราลดลงดังแสดงใน

ตารางที่ 7 เว้นแต่คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนร้อยละ 25 ทั้งความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³ มีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอีก เนื่องจากเศษเมลามีนมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากกว่าเศษเม็ดเมลามีนจึงทำให้การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตยังคงเพิ่มขึ้นอีกภายหลังจากอายุคอนกรีตมวลเบา 28 วัน

การแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาควบคุม (MO) โดยปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนร้อยละ 25 แสดงกำลังรับแรงอัดสูงสุด และมีค่าลดลงที่ปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนร้อยละ 15 และ 35 ซึ่งการผสมที่สัดส่วนทั้งสองมีค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกัน

สำหรับการแทนที่ทรายด้วยเศษเมลามีนร้อยละ 25 มีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์ความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อกมวลเบาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มาตรฐานเลขที่ มอก. 2601-2556 สำหรับคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³ (C14) ที่ความต้านทานแรงอัดไม่น้อยกว่า 5.0 เมกะปาสกาล ดังแสดงในตารางที่ 5

กำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลต่อไปนี้

- 1) การรวมกันของมวลรวมละเอียดทรายและเศษเมลามีนทั้งสอง มีผลกับขนาดผลของมวลรวมที่ดีขึ้น ซึ่งทำให้กำลังรับแรงอัดดีขึ้น
- 2) สำหรับรูปทรงเหลี่ยมและผิวหยาบของเศษเมลามีน ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เฟสกับมวลรวมเพิ่มขึ้น
- 3) ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ส่งผลทำให้เกิดขึ้นบาง ๆ ที่เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เฟสกับมวลรวม

3.3. การดูดซึมน้ำ

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนเทียบกับคอนกรีตมวลเบาควบคุมที่อายุปม 28 และ 60 วัน ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาควบคุม เนื่องจากเศษเมลามีนมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าทราย

AMM-08

จากคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีน (Mix II) ร้อยละ 25 มีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์ความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อกมวลเบาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศนั้น เมื่อตรวจสอบค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีน (Mix II) ดังกล่าวพบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนร้อยละ 25 ที่ความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³ อายุปม 60 วัน มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 24.96 (ยังไม่ผ่านเกณฑ์) โดยอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกมวลเบาตามมาตรฐาน มอก. สำหรับคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³ (C14) มีอัตราการดูดซึมน้ำไม่มากกว่าร้อยละ 20 ตามลำดับ

3.4. การนำความร้อน

ผลการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนเทียบกับคอนกรีตมวลเบาควบคุมที่อายุปม 28 และ 60 วัน ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนและคอนกรีตมวลเบาควบคุม มีค่าการนำความร้อนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการนำความร้อนมีความสัมพันธ์กับความพรุนรวมของคอนกรีตมวลเบา โดยสัมพันธ์กับการนำความร้อน (k) ของคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³ อยู่ในช่วง 0.079-0.108 w/m.²°K

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ด้วยวิธีการทดสอบสมมุติฐาน one sample t-test โดยกำหนดให้สมมุติฐานที่ตั้งไว้ (null hypothesis) และ สมมุติฐานทางเลือก (alternative hypothesis) คือ ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาควบคุมและคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ตามลำดับ ตรวจสอบระดับนัยสำคัญ (significant level) ร้อยละ 5 จากการวิเคราะห์พบว่า ค่า p-value ของทุกเงื่อนไข มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ทำให้เราสามารถกล่าวได้ว่า การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาควบคุมกับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษา การรีไซเคิลเศษเมลามีนโดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายบางส่วน ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 1) ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่แข็งตัวแล้ว มีความแปรปรวนเล็กน้อย
- 2) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้น
- 3) การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้น
- 4) ไม่ส่งผลกระทบต่อความร่อนอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการศึกษาในครั้งนี้เป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับการรีไซเคิลเศษเมลามีนโดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในคอนกรีตมวลเบา ผลปรากฏว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษฝุ่นเมลามีนร้อยละ 25 ที่ความหนาแน่น 1,300 กก./ม.³ มีศักยภาพในการแทนที่ทรายสำหรับคอนกรีตบล็อกมวลเบาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ เว้นแต่ยังมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่ามาตรฐานเล็กน้อย ซึ่งยังคงเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] 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, 776-781.
- [2] Soroushian, C., 1999. Experimental investigation of the optimized use of plastic flakes in normal-weight concrete. Magazine of Concrete Research (February), 27-33.
- [3] Marzouk, O.Y., Dheilily, R.M., Queneudec, M., 2007. Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. Waste Management 27, 310-318.
- [4] Chandra, S., Bemtsson, L., 2003. Lightweight aggregate concrete. Noyes Publication, Norwich, N.J.
- [5] Batayneh, M., Iqbal, M., Ibrahim, A., 2007. Use of selected waste materials in concrete mixes. Waste Management 27 (12), 1870-1876.
- [6] Phaiboon P., Mallika P., 2007. Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete. Waste Management 28, 1581-1588.
- [7] Rebeiz, K.S., 1996. Precast use of polymer concrete using unsaturated polyester resin based on recycled PET waste. Construction and Building Materials 10 (3), 215-220.



Editorial Office of Songklanakarin Journal of Science and Technology,
 Research and Development Office (RDO), Prince of Songkla University,
 Hat Yai, Songkhla, 90110 Thailand
 Tel. (66-74) 286959 Fax. (66-74) 286961
 Email : sjst@psu.ac.th

MOE. 0521.1103/0037

November 1, 2016

Mr. Chalermchai Chaitongrat

School of Mechanical Engineering,
 Suranaree University of Technology,
 111 University Avenue, Muang District,
 Nakhon Ratchasima, 30000
 Thailand

Subject: Publishing Acceptance

Dear Mr. Chalermchai

I would like to inform you that your manuscript ID SJST-2016-0184.R1 entitled "Recycling of melamine formaldehyde waste as fine aggregate in lightweight concrete" with Mr. Chalermchai Chaitongrat as a submitting author is accepted, and will be published in Vol. 40 No. 1 (January-February, 2018).

Thank you for your fine contribution. We're looking forward to your continued contributions to our journal.

Yours sincerely,

Associate Professor Dr. Proespichaya Kanatharana,

The Editor-in-Chief of Songklanakarin Journal of Science and Technology

ประวัติผู้เขียน

นายเฉลิมชัย ไชยขจรรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2559 ที่อำเภอตะพานหิน จังหวัดพิจิตร ปัจจุบันมีภูมิลำเนาอยู่ที่อำเภออาจสามารถ จังหวัดร้อยเอ็ด เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษา ปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนบ้านกุดเขียว จังหวัดร้อยเอ็ด มัธยมศึกษาตอนต้น ที่โรงเรียนอาจสามารถ วิทยา และมัธยมศึกษาตอนปลาย ที่โรงเรียนศรีรัชวิทยาลัย จังหวัดร้อยเอ็ด สำเร็จการศึกษาระดับ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตและระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2554

หลังจากสำเร็จการศึกษา ในปี พ.ศ. 2554 ได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรดุษฎี บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ณ สถาบันการศึกษาเดิม ขณะศึกษาระดับปริญญาเอก ผู้วิจัย ได้เป็นผู้สอนในรายวิชาปฏิบัติการต่าง ๆ ทั้งของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมยานยนต์ วิศวกรรมอากาศยานและสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต จากที่มีประสบการณ์ด้านการสอนปฏิบัติการ และการทำงานวิจัย ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ ความชำนาญทางด้านสมบัติของวัสดุเป็นอย่างดี โดยเฉพาะ วัสดุผสมระหว่างซีเมนต์และพอลิเมอร์ โดยมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ปรากฏดังภาคผนวก ก.

