



## รายงานการวิจัย

การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมด้วยขี้เถ้าจากวัสดุชีวมวล  
ป่นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

โดย

ปิยะพงศ์ กีสวัสดิ์คอน

ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวิกุล

รัฐศักดิ์ พรหมมาศ

สนับสนุนงบประมาณโดย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ประจำปีงบประมาณ 2559

# High Strength Concrete Mixed Biomass Ash using Microwave Curing

By

Piyapong Kesawadkorn

Thaweesak Rungsakthaweekul

Ratthasak Prommas

Granted by

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal year 2016



## กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำงานวิจัยฉบับนี้ คณะผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์และช่วยเหลือ รวมถึงการได้รับคำแนะนำและหลักการศึกษจากบุคคลหลายท่านเป็นอย่างดีเสมอมา ตลอดระยะเวลาของการจัดทำงานวิจัยจึงขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอนุเคราะห์ในการศึกษาด้านต่างๆ อันเป็นผลที่จัดทำงานวิจัยนี้ให้ประสบความสำเร็จและลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้ จนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ปิยะพงศ์ กี่สวัสดิ์คอน  
กันยายน 2559



## บทคัดย่อ

รหัสโครงการ :A 27/2559

ชื่อโครงการ :การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมด้วยซีเมนต์จากวัสดุชีวมวลป่นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ชื่อนักวิจัย :นายปิยะพงศ์ กี่สวัสดิ์คอน, นายทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล และนายรัฐศักดิ์ พรหมมาศ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบ่มคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ซีเมนต์จากวัสดุชีวมวลเป็นส่วนผสม โดยทำการบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟเพื่อทำให้เกิดความร้อนและมีการถ่ายเทมวลออกจากคอนกรีต เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางกลเฉพาะกำลังอัด โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางกลเฉพาะกำลังอัดกับการบ่มคอนกรีตกำลังสูงด้วยวิธีธรรมชาติที่ใช้ระยะเวลาในการบ่มที่อายุ 28 วัน

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงพบว่า เมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังวัตต์สูงจะใช้เวลาในการบ่มน้อยกว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่ำโดยที่คลื่นไมโครเวฟกำลังสูงจะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงกว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟที่กำลังต่ำ ซึ่งเกิดอัตราการถ่ายเทมวลที่เหมาะสมกว่า

คำสำคัญ : ไมโครเวฟ วัสดุชีวมวล คอนกรีตกำลังสูง

E-mail Address : p\_pupay@hotmail.com

ระยะเวลาโครงการ : ตุลาคม 2558 - กันยายน 2559



## Abstract

Code of project : A 27/2559  
Project name : High Strength Concrete Mixed Biomass Ash using Microwave Curing.  
Researcher : Mr. Piyapong Kesawadkorn, Mr. Thaweesak Rungsakthaweekul and Mr. Ratthasak Prommas

This research is a study of high strength concrete by using a mixture of ashes from biomass materials, cured with a microwave to build up heat in side and mass transfer from the concrete. The objective of this study to explained physical properties and mechanical properties, particularly compression strength of concrete. To compare the physical properties and mechanical properties of concrete with a compressive high strength of natural curing time at 28 days.

The study of physical properties and compressive strength of high strength concrete was found that. Curing of concrete using microwave at high power is required to take time to curing than the low watt microwave. The high power microwave power, the concrete compressive strength is higher than the microwave at low power. The rate of mass transfer from the inside to outside of the concrete is appropriate.

Keywords : Microwave Biomass Materials High Strength Concrete  
E-mail Address : p\_pupay@hotmail.com  
Period of Project : September 2015- October 2016

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปประกอบ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 คำนิยาม	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 คอนกรีต	4
2.2 คอนกรีตกำลังสูง	5
2.3 สารเคมีผสมเพิ่ม	9
2.4 วัสดุซีเมนต์มวล	10
2.5 เถ้าปาล์มน้ำมัน	11
2.6 เถ้าขานอ้อย	12
2.7 การปมคอนกรีต	13
2.8 พลังงานไมโครเวฟ	14
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	17
3.1 แผนผังการดำเนินการทำงาน	17
3.2 การเตรียมข้อมูล	18
3.3 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูง	18
3.4 สัดส่วนที่เหมาะสมในการผสมคอนกรีตกำลังสูง	22
3.5 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือเครื่องใช้	23
3.6 ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูง	23
3.7 การขึ้นรูปของวัสดุผสมสำหรับคอนกรีตกำลังสูง	36

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.8 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูง	39
3.9 การวิเคราะห์	40
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	42
4.1 ผลการทดลองการหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง ซึ่งคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมวัสดุชีวมวลในอัตราส่วนต่างกัน จะมีน้ำหนักที่ต่างกัน	42
4.2 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักก่อนและหลังบ่มของก้อนตัวอย่าง ด้วยไมโครเวฟโดยเฉลี่ย	45
4.3 ผลการทดลองกำลังอัดคอนกรีตกำลังสูงที่มีการบ่ม ด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลา/Watts ที่ต่างกัน	51
4.4 ผลการทดลองการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูง ด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลาต่างๆ	59
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	62
5.1 สรุป	62
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
บรรณานุกรม	64
ภาคผนวก	65
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ	66
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง	73
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบหาค่ากำลังต้านทานรับแรงอัด ของก้อนตัวอย่าง	89
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบหาปริมาณการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่าง	100
ภาคผนวก จ รูปประกอบการทดสอบ	111

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3-1	ค่าการยุบตัวที่ใช้ออกแบบในคอนกรีตกำลังสูง	18
3-2	ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ	19
3-3	ปริมาณน้ำและฟองอากาศ	19
3-4	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	20
3-5	สัดส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูง ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ที่กำลังอัด 450 ksc	22
ก-1	การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	67
ก-2	การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าปาล์มน้ำมัน	68
ก-3	การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าขานอ้อย	69
ก-4	การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด	70
ก-5	การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ	71
ก-6	การทดสอบความต้านทานต่อการขีดสีของมวลรวมโดยใช้เครื่องทดสอบเองเจอลิส	72
ข-1	การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง 90 นาที กำลังไฟ 450 Watts	74
ข-2	การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง 90 นาที กำลังไฟ 720 Watts	75
ข-3	การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง 90 นาที กำลังไฟ 900 Watts	76
ข-4	การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง 120 นาที กำลังไฟ 450 Watts	77
ข-5	การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง 120 นาที กำลังไฟ 720 Watts	78
ข-6	การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง 120 นาที กำลังไฟ 900 Watts	79
ข-7	การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง 150 นาที กำลังไฟ 450 Watts	80
ข-8	การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง 150 นาที กำลังไฟ 720 Watts	81
ข-9	การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง 150 นาที กำลังไฟ 900 Watts	82
ข-10	การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง 28 วัน	83
ข-11	ผลการทดสอบการหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างทดสอบที่เวลาต่างๆ	84



สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข-12	ผลการทดสอบการหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างทดสอบที่ 28 วัน	84
ข-13	ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักก่อนและหลังบ่มของก้อนตัวอย่างด้วยไมโครเวฟ	85
ข-14	ปริมาณความชื้นที่ระเหยหลังจากการบ่มด้วยไมโครเวฟ	85
ข-15	ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักก่อนและหลังบ่มของก้อนตัวอย่างทดสอบที่ 28 วัน	86
ข-16	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของก้อนตัวอย่างทดสอบที่ระยะเวลาในการบ่มต่างๆ กัน	86
ข-17	ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของก้อนตัวอย่างทดสอบที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน	87
ข-18	ผลการทดสอบการหาค่าปริมาณการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่างทดสอบที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ	87
ข-19	ผลการทดสอบการหาค่าปริมาณการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่างทดสอบที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน	88
ค-1	แสดงผลการทดสอบก้อนตัวอย่างการบ่มที่ระยะเวลา 90 นาที กำลังไฟ 450 Watts	90
ค-2	แสดงผลการทดสอบก้อนตัวอย่างการบ่มที่ระยะเวลา 90 นาที กำลังไฟ 720 Watts	91
ค-3	แสดงผลการทดสอบก้อนตัวอย่างการบ่มที่ระยะเวลา 90 นาที กำลังไฟ 900 Watts	92
ค-4	แสดงผลการทดสอบก้อนตัวอย่างการบ่มที่ระยะเวลา 120 นาที กำลังไฟ 450 Watts	93
ค-5	แสดงผลการทดสอบก้อนตัวอย่างการบ่มที่ระยะเวลา 120 นาที กำลังไฟ 720 Watts	94
ค-6	แสดงผลการทดสอบก้อนตัวอย่างการบ่มที่ระยะเวลา 120 นาที กำลังไฟ 900 Watts	95
ค-7	แสดงผลการทดสอบก้อนตัวอย่างการบ่มที่ระยะเวลา 150 นาที กำลังไฟ 450 Watts	96
ค-8	แสดงผลการทดสอบก้อนตัวอย่างการบ่มที่ระยะเวลา 150 นาที กำลังไฟ 720 Watts	97
ค-9	แสดงผลการทดสอบก้อนตัวอย่างการบ่มที่ระยะเวลา 150 นาที กำลังไฟ 900 Watts	98
ค-10	แสดงผลการทดสอบก้อนตัวอย่างการบ่มที่ระยะเวลา 28 วัน	99

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ง-1	ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟ ที่ระยะเวลา 90 นาทีกำลังไฟ 450 Watts	101
ง-2	ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟ ที่ระยะเวลา 90 นาทีกำลังไฟ 720 Watts	102
ง-3	ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟ ที่ระยะเวลา 90 นาทีกำลังไฟ 900 Watts	103
ง-4	ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟ ที่ระยะเวลา 120 นาทีกำลังไฟ 450 Watts	104
ง-5	ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟ ที่ระยะเวลา 120 นาทีกำลังไฟ 720 Watts	105
ง-6	ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟ ที่ระยะเวลา 120 นาทีกำลังไฟ 900 Watts	106
ง-7	ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟ ที่ระยะเวลา 150 นาทีกำลังไฟ 450 Watts	107
ง-8	ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟ ที่ระยะเวลา 150 นาทีกำลังไฟ 720 Watts	108
ง-9	ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟ ที่ระยะเวลา 150 นาทีกำลังไฟ 900 Watts	109
ง-10	ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟ ที่ระยะเวลา 28 วัน	110

## สารบัญรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
3-1	แผนผังการดำเนินการทำงาน	17
3-2	ปูนซีเมนต์	23
3-3	ขวดแก้วทดลองเลอชาแตรีแอร์ (LeChatelier)	24
3-4	เทอร์โมมิเตอร์	24
3-5	กรวยก้านยาว	24
3-6	น้ำมันก๊าด	25
3-7	อ่างควบคุมอุณหภูมิ	25
3-8	เครื่องชั่งสามารถชั่งได้ละเอียด 0.1 กรัม	25
3-9	เครื่องชั่งสามารถชั่งได้ละเอียด 0.1 กรัม	26
3-10	กระบอกตวงขนาดความจุ 500 มิลลิลิตร	27
3-11	กรวยตัด	27
3-12	ตุ้บที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ $110 \pm 5$ องศาเซลเซียส	27
3-13	เทอร์โมมิเตอร์	28
3-14	ทรายประมาณ 1000 กรัม	28
3-15	ถาดแอสตันเลส	28
3-16	เครื่องชั่งสามารถชั่งได้ละเอียด 0.1 กรัม	30
3-17	ตะกร้าสำหรับชั่งหินในน้ำ	30
3-18	ตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร)	31
3-19	ตุ้บที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ $110 \pm 5$ องศาเซลเซียส	31
3-20	เทอร์โมมิเตอร์	31
3-21	หินประมาณ 5000 กรัม	32
3-22	ถาดแอสตันเลส	32
3-23	เครื่องลอสแอนเจลิส (Los Angeles Machine)	33
3-24	ลูกเหล็ก (Abrasive Charge)	34
3-25	เครื่องชั่งสามารถชั่งได้ละเอียด 0.1 กรัม	34
3-26	ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 12	34
3-27	หินประมาณ 5000 กรัม	35
3-28	ส่วนผสมที่ทำการชั่งแล้ว	36
3-29	แสดงการผสมส่วนผสม	36

## สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3-30	ใส่น้ำและสารลดน้ำลงไปในส่วนผสม	37
3-31	แสดงการผสมหินให้เข้ากับส่วนผสม	37
3-32	แสดงการนำส่วนผสมเสร็จใส่แบบหล่อ	38
3-33	แสดงส่วนผสมเสร็จแล้วเข้าแบบหล่อ	38
3-34	แสดงการซังน้ำหนักตัวอย่างทดสอบ	39
3-35	การทดสอบการดูดซึมน้ำ	39
3-36	การทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด	40
4-1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของอัตราส่วนผสมต่างๆ กับระยะเวลาในการบ่มที่กำลังไมโครเวฟ 450 Watts	42
4-2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของอัตราส่วนผสมต่างๆ กับระยะเวลาในการบ่มที่กำลังไมโครเวฟ 720 Watts	43
4-3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของอัตราส่วนผสมต่างๆ กับระยะเวลาในการบ่มที่กำลังไมโครเวฟ 900 Watts	44
4-4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของก้อนตัวอย่างก่อนและหลังการบ่ม ด้วยไมโครเวฟเทียบกับระยะเวลาต่างๆ ในการบ่มของอัตราส่วนผสม 5:15	45
4-5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของก้อนตัวอย่างก่อนและหลังการบ่ม ด้วยไมโครเวฟเทียบกับระยะเวลาต่างๆ ในการบ่มของอัตราส่วนผสม 10:10	46
4-6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของก้อนตัวอย่างก่อนและหลังการบ่ม ด้วยไมโครเวฟเทียบกับระยะเวลาต่างๆ ในการบ่มของอัตราส่วนผสม 15:5	47
4-7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่ระเหยหลังการบ่มด้วย ไมโครเวฟอัตราส่วนผสมเถ้าปาล์ม 5% :เถ้าขานอ้อย 15% เทียบกับระยะเวลา ของการบ่มที่ 28 วัน	48
4-8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่ระเหยหลังการบ่มด้วย ไมโครเวฟอัตราส่วนผสมเถ้าปาล์ม 10% :เถ้าขานอ้อย 10% เทียบกับระยะเวลา ของการบ่มที่ 28 วัน	49
4-9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่ระเหยหลังการบ่มด้วย ไมโครเวฟอัตราส่วนผสมเถ้าปาล์ม 15% :เถ้าขานอ้อย 5% เทียบกับระยะเวลา ของการบ่มที่ 28 วัน	50
4-10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดและระยะเวลาของการบ่ม ด้วยไมโครเวฟที่ 450 Watts	51

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4-11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดและระยะเวลาของการบ่มด้วยไมโครเวฟที่ 720 Watts	52
4-12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดและระยะเวลาของการบ่มด้วยไมโครเวฟที่ 900 Watts	53
4-13	กราฟแสดงกำลังต้านทานแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่บ่มด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลาและกำลังวัตต์ต่างๆ ของสัดส่วนผสมเถ้าปาล์ม 5% : เถ้าชานอ้อย 15% เทียบกับการบ่ม 28 วัน	55
4-14	กราฟแสดงกำลังต้านทานแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่บ่มด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลาและกำลังวัตต์ต่างๆ ของสัดส่วนผสมเถ้าปาล์ม 10% : เถ้าชานอ้อย 10% เทียบกับการบ่ม 28 วัน	56
4-15	กราฟแสดงกำลังต้านทานแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่บ่มด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลาและกำลังวัตต์ต่างๆ ของสัดส่วนผสมเถ้าปาล์ม 15% : เถ้าชานอ้อย 5% เทียบกับการบ่ม 28 วัน	57
4-16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่างทดสอบกับระยะเวลาในการบ่มด้วยกำลังไมโครเวฟที่ระยะเวลา 90 นาที	59
4-17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่างทดสอบกับระยะเวลาในการบ่มด้วยกำลังไมโครเวฟที่ระยะเวลา 120 นาที	60
4-18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่างทดสอบกับระยะเวลาในการบ่มด้วยกำลังไมโครเวฟที่ระยะเวลา 150 นาที	61
จ-1	รูปการร่อนวัสดุชีวมวลด้วยเครื่องเขย่า	112
จ-2	รูปวัสดุชีวมวลที่ร่อนด้วยเครื่องเขย่าแล้ว	112
จ-3	รูปการหล่อก้อนตัวอย่าง	113
จ-4	รูปก้อนตัวอย่างทดสอบหลังการถอดแบบหล่อ	113
จ-5	รูปการบ่มก้อนตัวอย่างทดสอบด้วยไมโครเวฟ	114
จ-6	รูปการชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่าง	114
จ-7	รูปการชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่าง	115
จ-8	รูปลักษณะภายในก้อนตัวอย่างหลังการบ่ม	115

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

คอนกรีตกำลังสูงมีบทบาทในวงการก่อสร้างของไทยโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑลที่นิยมก่อสร้างอาคารสูงโดยใช้คอนกรีตกำลังสูงสำหรับเสาอาคารหรือในงานโครงสร้างอื่นๆ ที่ต้องการความแข็งแรงหรือโครงสร้างที่ต้องรับน้ำหนักมากเป็นพิเศษเพื่อให้ได้ขนาดของโครงสร้างที่เล็กกว่าการใช้คอนกรีตกำลังปกติ ดังนั้น การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงให้มีคุณสมบัติทางด้านการรับกำลังอัดที่สูงขึ้นและมีประสิทธิภาพในการใช้งานได้ดีที่สุดโดยมีระยะเวลาในการพัฒนา กำลังรับแรงอัดที่สั้นลงโดยปกติหากยึดตามมาตรฐานการใช้งานคอนกรีตจะต้องมากกว่า 24 ชั่วโมงในการพัฒนาคุณสมบัติ ดังนั้น การลดระยะเวลาในการพัฒนากำลังรับแรงอัดจึงมีความสำคัญแต่ด้วยเทคโนโลยีการบ่มเร่งกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงในช่วงต้นด้วยวิธีต่างๆ ในปัจจุบันนั้นมีข้อเสียที่แตกต่างกัน เช่น การบ่มคอนกรีตโดยเพิ่มความชื้น มีข้อเสีย คือ มักจะเกิดรอยร้าวของดินเหนียวที่นำมาใช้และต้องทำความสะอาดผิวหน้าคอนกรีตหลังบ่มเสร็จและการบ่มด้วยการเร่งกำลังโดยใช้ไอน้ำให้ความชื้นและความร้อนในการบ่มคอนกรีตซึ่งมีข้อเสีย คือ เวลาที่ใช้บ่มต้องไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง และคอนกรีตมีการแปรผันของคุณสมบัติมากเนื่องจากการกระจายความร้อนในคอนกรีตไม่สม่ำเสมอ ดังนั้น การนำเอาเทคโนโลยีไมโครเวฟมาใช้ในการเร่งกำลังอัดในช่วงต้นจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงและมีการกระจายความร้อนสม่ำเสมอแต่เนื่องจากองค์ความรู้ทางด้านการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นไปที่การหาความสัมพันธ์เชิงเวลาและเปรียบเทียบกำลังอัดที่ได้จากการทดลองเป็นหลักฐานกลไกพื้นฐานของการถ่ายเทมวลสารและความร้อนที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟโดยใช้คลื่นไมโครเวฟในการให้พลังงานความร้อนกับคอนกรีตนั้นยังไม่มีการศึกษาทดลองจึงเกิดแนวคิดที่จะทำการศึกษาการบ่มคอนกรีตกำลังสูงด้วยเตาอบไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อนได้ คลื่นไมโครเวฟจะพุ่งเข้าสู่วัสดุจากทุกทิศทางโดยรอบของผนังเตาด้านในแล้วแผ่กระจายสู่วัสดุเมื่อคลื่นไปกระทำทำให้โมเลกุลของวัสดุเกิดการสั่นและเสียดสีกันก่อให้เกิดเป็นพลังงานความร้อนอย่างรวดเร็วและรักษาคุณภาพของวัสดุไว้ได้อย่างครบถ้วนซึ่งเป็นคุณสมบัติเด่นของคลื่นไมโครเวฟ

แนวคิดที่จะศึกษาการบ่มคอนกรีตกำลังสูงด้วยเตาอบไมโครเวฟที่ใช้วัสดุชีวมวลในการผสมโดยวิธีการทำความร้อนในระยะเวลาสั้นๆ ด้วยพลังงานไมโครเวฟ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกำลังอัดที่ดี

ขึ้นและลดระยะเวลาในการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตโดยทำการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาคุณสมบัติทางกลในด้านกำลังอัด และคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตกำลังสูง

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมวัสดุชีวมวลจากการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมวัสดุชีวมวลจากการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงที่มีส่วนผสมของวัสดุชีวมวลในสัดส่วนต่างๆ และกำลังไมโครเวฟที่ใช้บ่มคอนกรีต

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement)

1.3.2 ทราฮายาผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และ 100

1.3.3 หินขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 3/4 นิ้ว

1.3.4 แทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

1.3.5 แทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

1.3.6 สารลดน้ำพิเศษ (Super plasticizer) โดยใช้ 3.0 % ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

1.3.7 Water Cement Ratio ใช้เท่ากับ 0.35

1.3.8 ใช้วัสดุตัวอย่างในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม.

1.3.9 กำลังไมโครเวฟที่ใช้บ่ม 450, 720, 900 วัตต์

1.3.10 เวลาที่ใช้ในการบ่มคอนกรีตกำลังสูง 90, 120, 150 นาที

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมวัสดุชีวมวลได้

1.4.2 ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติทางกลด้านการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงที่ได้จากการผสมวัสดุชีวมวล

1.4.3 สามารถลดระยะเวลาในการบ่มคอนกรีตและลดพื้นที่ที่ใช้ในการจัดเก็บจากการบ่มคอนกรีตด้วยธรรมชาติ

1.4.4 สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุชีวมวลได้

1.4.5 เป็นพลังงานอีกด้านหนึ่งซึ่งไม่ทำลายธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

## 1.5 คำนิยาม

1.5.1 **คอนกรีต (Concrete)** เป็นวัสดุผสมที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ ปูนซีเมนต์วัสดุผสม (เช่น หิน ทราย หรือ กรวด) และน้ำ

1.5.2 **ชีวมวล (Biomass)** คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร

1.5.3 **ไมโครเวฟ (Microwave)** เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงมากถึง 2,450 ล้านรอบต่อวินาที มีลักษณะคล้ายกับคลื่นวิทยุแต่มีความถี่ที่สั้นกว่า หัวใจสำคัญของเตาไมโครเวฟคือตัวแม่กนิตรอนที่จะเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นไมโครเวฟซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์

1.5.4 **คอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete)** คอนกรีตกำลังอัดสูงเป็นคอนกรีตที่ถูกออกแบบมาให้รองรับงานที่ต้องการกำลังอัดสูงกว่า 450 ksc ที่อายุ 28 วัน โดยส่วนผสมคอนกรีตประเภทนี้จะใช้น้ำยาผสมคอนกรีตประเภทลดน้ำอย่างมาก





## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การป้อนคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีความซับซ้อน ซึ่งอาศัยองค์ความรู้ในหลายๆ ด้านในการวิเคราะห์พฤติกรรม เช่น ความรู้ทางการถ่ายเทมวลสารและความร้อนในวัสดุพูน ความรู้ทางด้านพลังงานไมโครเวฟ รวมไปถึงความรู้ทางด้านโครงสร้างของคอนกรีตซึ่งในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาถึงองค์ความรู้ต่างๆ เหล่านี้มากมาย

ในที่นี้จะกล่าวถึงการนำวัสดุทางชีวภาพมาเป็นส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงและป้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ค่ากำลังวัตต์ในระดับต่างๆ เปรียบเทียบกับเวลาที่ต่างกันของวิธีการป้อนคอนกรีตกำลังสูงด้วยวิธีการป้อนแบบธรรมดาแล้วนำมาทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลจึงจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านคอนกรีต สารผสมเพิ่ม วิธีการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมพลังงานไมโครเวฟ และการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ดังต่อไปนี้

#### 2.1 คอนกรีต

คอนกรีต เป็นวัสดุผสมที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ปูนซีเมนต์ วัสดุผสม เช่น หิน ทราย หรือ กรวด และน้ำ โดยอาจจะมีสารเคมีเติมเพิ่มเข้าไปสำหรับคุณสมบัติด้านอื่น เมื่อผสมเสร็จคอนกรีตจะแข็งตัวอย่างช้าๆ ซึ่งน้ำและซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกันในลักษณะที่เรียกว่า การไฮเดรชัน โดยซีเมนต์จะเริ่มจับตัวกับวัสดุอื่นและแข็งตัว ซึ่งในสถานะนี้จะนิยมเรียกกันว่า คอนกรีต ความแข็งแรงของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หลังจากที่ผสม และยังแข็งแรงขึ้นภายหลังจากการแข็งตัว โดยประมาณหลังจากแข็งตัวแล้ว 28 วัน ความแข็งแรงจะเริ่มคงที่

คอนกรีตมีใช้กันในงานก่อสร้างหลายชนิด ซึ่งรวมถึง อาคาร ถนน เขื่อน สะพาน อนุสาวรีย์ และงานก่อสร้างต่างๆ ซึ่งมีเห็นได้ทั่วไปคอนกรีตที่ใช้เป็นโครงสร้างอาจแบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

##### 2.1.1 คอนกรีตล้วน (Plain concrete)

ใช้แต่คอนกรีตอย่างเดียวล้วนๆ ไม่มีวัสดุอื่นๆ มาเสริมหรือมาร่วมด้วยเลย ได้แก่ โครงสร้างที่มีแต่แรงอัดกระทำอย่างเดียว เช่น ฐานเครื่องจักรที่หนามากๆ หรือเขื่อนกันดินแบบที่ใช้หน้าหนักของตัวเขื่อนต้านแรงดันของดิน (Gravity wall) ที่สูงไม่เกิน 1.00 เมตร เป็นต้น

##### 2.1.2 คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete)

ใช้เหล็กเส้นเสริมกับคอนกรีตเป็นโครงสร้างที่มีทั้งแรงอัดและแรงดึงกระทำซึ่งเกิดจากโมเมนต์ดัดให้คอนกรีตทำหน้าที่ต้านทานแรงอัด และใช้เหล็กเสริมทำหน้าที่ต้านทานแรงดึงเหล็กเสริมและคอนกรีตมีสัมประสิทธิ์การยืดหดตัวใกล้เคียงกันจึงช่วยกันรับและถ่ายแรงได้ดี โครงสร้างแบบคอนกรีตเสริมเหล็กจึงมีความแข็งแรงมากกว่าโครงสร้างแบบคอนกรีตล้วน

### 2.1.3 คอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรง (Pre-stressed concrete)

เป็นคอนกรีตที่ถูกอัดแรงไว้ก่อนใช้งาน โดยใช้ลวดเหล็กที่ทนแรงดึงสูงเอาคอนกรีตมาใช้ประโยชน์หมดทั้งรูปตัดดีกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กช่วยประหยัดพื้นที่ใช้กับงานสะพานและอาคาร เช่น ในระบบพื้น เป็นต้น

คุณสมบัติหลักของคอนกรีตคือการรับแรงอัดสูงในขณะที่สามารถรับแรงดึงได้ต่ำ (ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ของแรงอัด) โดยเมื่อต้องการให้คอนกรีตสามารถรับแรงดึงจะมีการเสริมวัสดุอื่นเพิ่มเข้าไปในคอนกรีตโดยจะเรียกว่า คอนกรีตเสริมแรงหรือคอนกรีตเสริมเหล็กที่เรียกกัน (โดยเสริมแรงด้วยเหล็ก) วัสดุเหล่านี้จะช่วยรับแรงดึงภายในคอนกรีตซึ่งงานโครงสร้างอาคารส่วนใหญ่ นิยมใช้คอนกรีตเสริมแรงแทนที่คอนกรีตเปลือย

นอกจากนี้ในงานก่อสร้างยังมีการใช้วิธีการที่เรียกว่า คอนกรีตอัดแรง โดยทำการใส่แรงเข้าไปในคอนกรีตหล่อสำเร็จที่หล่อมาจากโรงงาน โดยเมื่อนำไปใช้งาน แรงที่ใส่เข้าไปในคอนกรีตจะหักล้างกับน้ำหนักของตัวคอนกรีตเองและน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมาซึ่งวิธีการนี้จะทำให้คอนกรีตสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มมากขึ้น โดยงานสะพานและทางยกระดับนิยมใช้คอนกรีตอัดแรงคอนกรีตจะมีสัดส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อหิน ดังนี้

สัดส่วน 1 : 1.5 : 3 สำหรับงานเสาและโครงสร้าง

สัดส่วน 1 : 2 : 4 สำหรับงานพื้น, คาน

สัดส่วน 1 : 2.5 : 4 สำหรับงานถนน, ฐานราก

### 2.2 คอนกรีตกำลังสูง (High strength concrete)

คอนกรีตกำลังสูงเริ่มมีบทบาทในวงการก่อสร้างของไทยเมื่อไม่นานมานี้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2530 เป็นต้นมา การขยายตัวของเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วทำให้ที่ดินมีราคาสูงขึ้นมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจึงนิยมก่อสร้างอาคารสูงและใช้คอนกรีตกำลังสูงสำหรับเทเสาของอาคาร คอนกรีตกำลังสูงเป็นเรื่องที่ค่อนข้างใหม่สำหรับวิศวกรของไทยแต่ในต่างประเทศโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศแถบยุโรป ญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกาได้มีการศึกษาเรื่องคอนกรีตมานานพอควร การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงเริ่มขึ้นในสหรัฐอเมริกาในช่วงปี พ.ศ. 2493 (ค.ศ.1960) ในขณะนั้นถือว่าคอนกรีตมีกำลังสูงเมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐานสูงกว่า 340 ksc หลังปี พ.ศ. 2503 (ค.ศ.1960) จึงมีการพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงช่วง 410 ถึง 520 ksc เพื่อใช้ในการก่อสร้างอาคาร และในต้นทศวรรษต่อมาสามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงถึง 620 ksc ในปัจจุบันนี้วิทยาการคอนกรีตเทคโนโลยีได้พัฒนาไปมากมีการใช้สารเคมีในการลดปริมาณน้ำเพื่อทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำลงมีการใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อเพิ่มกำลังอัดประลัยและความทนทานของคอนกรีตให้สูงขึ้น ดังนั้นการทำคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่า 1,100 ksc จึงเป็นเรื่องที่สามารถทำได้ไม่ยากนัก สมาคมคอนกรีตของอเมริกาได้กำหนดให้คอนกรีตที่มีกำลังอัดมากกว่า 410 ksc เป็นคอนกรีตกำลังสูงซึ่งโดยทั่วไปแล้วผลการทดสอบคอนกรีตกำลังสูงมีความเป็ยเบนสูงกว่าคอนกรีตกำลังธรรมดาการที่ผลการทดสอบคอนกรีตกำลังสูงมีความเป็ยเบนมากย่อมทำให้ต้องเผื่อค่ากำลังของคอนกรีตมากขึ้นกว่าปกติ ACI 318 ได้กำหนดการยอมรับกำลังของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบ ดังนี้

ก. กำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่างติดต่อกันต้องมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ออกแบบ

ข. กำลังอัดของคอนกรีตที่ทดสอบได้ ต้องไม่มีตัวอย่างอันใดที่มีกำลังอัดต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้ เกิน 3.4 MPa (35 ksc)

ข้อกำหนดนี้ใช้ได้ดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับคอนกรีตที่มีกำลังอัดในช่วงระยะ 21 ถึง 34 MPa (214 ถึง 350 ksc) ในกรณีที่ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงไม่เป็นไปตามข้อกำหนดควรดูรายละเอียดของผลการทดสอบและข้อมูลอื่นประกอบการตัดสินใจ เช่น เมื่อพบว่าผลการทดสอบกำลังอัดของบางตัวอย่างต่ำกว่า 3.4 MPa (35 ksc) ไม่มากนักจะต้องตรวจสอบส่วนผสมและปรับส่วนผสมให้มีกำลังอัดตามที่ต้องการในการทำงานต่อไปและสำหรับคอนกรีตที่เทไปแล้วให้พิจารณาการพัฒนากำลังและอายุการใช้งาน เนื่องจากคอนกรีตกำลังสูงมักมีการพัฒนากำลังที่ดีแม้ว่าจะมีอายุมากกว่า 28 วันขึ้นไปและหากการทำการก่อสร้างอาคารดังกล่าวสามารถยึดออกไปได้ก็ไม่จำเป็นต้องทุบทิ้งและทำใหม่ เพราะกำลังของคอนกรีตอาจสูงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักเมื่อเปิดใช้งานอาคารดังกล่าว ทั้งนี้อาจใช้การทดสอบการรับน้ำหนักตามมาตรฐานระบุเพื่อให้มั่นใจในความแข็งแรงประกอบด้วย

### 2.2.1 คุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูง

คุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงเช่น ความหนาแน่น ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด โมดูลัสยืดหยุ่น อัตราส่วนโพซอลอนโมดูลัส แตกร้าวและการรับแรงดึง อาจแตกต่างจากคอนกรีตกำลังธรรมดาไปได้บ้างซึ่งรายละเอียดของแต่ละหัวข้อมีรายละเอียดดังนี้

ก. ความหนาแน่น คอนกรีตกำลังสูงมีความหนาแน่นมากกว่าคอนกรีตกำลังธรรมดา ไม่มากนักเมื่อใช้วัสดุปกติทั่วไปในส่วนผสม ตัวอย่างเช่น คอนกรีตกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ประมาณ 300-350 ksc มีความหนาแน่น 2,410-2,430 ksc ขณะที่คอนกรีตกำลังสูงที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 600-700 ksc มีความหนาแน่นเท่ากับ 2,490-2,525 ksc ในทางปฏิบัติสามารถใช้ความหนาแน่นของคอนกรีตเท่ากับ 2,400 ksc ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมและใกล้เคียงกับค่าจริง

ข. ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมในคอนกรีต การใช้วัสดุปอซโซลานหรือเถ้าถ่านหิน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ขนาดขององค์อาคาร อุณหภูมิของอาคารรอบคอนกรีต เป็นต้น ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ในการก่อสร้างอาคารสูง (อาคาร Water Tower place) ในเมืองซิดาโกมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 56 องศาเซลเซียส สำหรับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ 502 kg/m<sup>3</sup> หรือเป็นความร้อนที่เพิ่มขึ้นประมาณ 11 องศาเซลเซียส ต่อปูนซีเมนต์ 100 kg อย่างไรก็ตามหากการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็นแบบระบบปิด (คือไม่มีการถ่ายเทความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม) อุณหภูมิของคอนกรีตจะเพิ่มสูงมากกว่านี้

**ค. ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด** ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตกำลังสูงภายใต้แรงอัดจะมีความชันสูงกว่าเป็นเส้นตรงมากกว่าและมีความเครียดที่ความเค้นสูงมากกว่าคอนกรีตกำลังที่ต่ำกว่า ซึ่งเป็นคอนกรีตกำลังสูงตั้งแต่ 650 ถึง 900 ksc เมื่อเพิ่มกำลังอัดแก่คอนกรีตจนถึงค่าสูงสุดแล้ว คอนกรีตจะวิบัติอย่างรุนแรงและความเค้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากการสะสมพลังงานในคอนกรีตมาก และเมื่อคอนกรีตวิบัติมีการคายพลังงานออกมาอย่างรวดเร็ว และประกอบกับกำลังยึดเหนี่ยวที่ติระหว่างซีเมนต์เพสต์และหิน จึงทำให้รอยแตกที่เกิดขึ้นวิ่งผ่าหินเป็นจำนวนมากแทนที่จะเลาะไปตามแนวขอบหิน การทดสอบเพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตกำลังสูงภายหลังจากความเค้นถึงค่าสูงสุดแล้วทำได้ไม่ถนัดนักโดยใช้เครื่องทดสอบที่มีความแข็ง (Stiff) มากเป็นพิเศษใช้ระบบควบคุมการกดตัวอย่างคอนกรีต และเพิ่มความเครียดให้แก่คอนกรีตด้วยอัตราคงที่อย่างช้าๆ ดังนั้นคอนกรีตจึงค่อยๆ เสียหายภายหลังจากการรับแรงสูงสุดแทนที่จะวิบัติแบบทันทีทันใดหรือระเบิดออกมา ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของความเค้น - ความเครียดที่สมบูรณ์คอนกรีตกำลังสูงจะมีรอยร้าวเล็กๆ ภายใน (Internal Micro cracks) น้อยกว่าคอนกรีตกำลังธรรมดาที่ความเครียดเท่ากัน ดังนั้นจึงทำให้ความเครียดด้านข้าง (Lateral Strain) มีค่าต่ำกว่าด้วยการที่คอนกรีตกำลังสูงมีการขยายตัวทางด้านข้างน้อยกว่าคอนกรีตกำลังธรรมดาเมื่อรับแรงในแนวแกน แสดงว่าการเสริมเหล็กปลอกในเสาสำหรับคอนกรีตกำลังสูงจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าในกรณีของเสาที่ทำจากคอนกรีตกำลังธรรมดา

**ง. โมดูลัสยืดหยุ่น** โดยทั่วไปโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูงมีค่าอยู่ระหว่าง  $30 \times 10^3$  ถึง  $45 \times 10^3$  MPa ซึ่งสูงกว่าโมดูลัสของคอนกรีตธรรมดาและโดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น - ความเครียดของคอนกรีตเป็นเส้นโค้งเล็กน้อยดังนั้นการกำหนดตำแหน่งที่ต่างกันในการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจึงทำให้ได้ค่าที่แตกต่างกันได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูงจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อกำลังรับแรงของคอนกรีตสูงขึ้น ทั้งนี้อัตราการเพิ่มขึ้นของโมดูลัสยืดหยุ่นจะลดลงเมื่อกำลังเพิ่มมากขึ้น โดย ACI 363 ได้ให้ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง

$$E_c = 3,320 \sqrt{f'_c} + 6,900 \quad \text{MPa}$$

$$\text{เมื่อ } f'_c \text{ มีค่าระหว่าง } 21 \text{ ถึง } 83 \quad \text{MPa}$$

$$(214 \text{ ถึง } 846 \text{ ksc})$$

**จ. อัตราส่วนโพซอง** ข้อมูลอัตราส่วนโพซอง (Poisson's Ratio) ของคอนกรีตกำลังสูงมีค่าน้อยกว่าและมีความหลากหลาย อัตราส่วนโพซองของคอนกรีตกำลังสูงที่ไข่มวลรวมเบาเมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน และมีกำลังอัดจนถึง 73 MPa (744 ksc) มีค่าเท่ากับ 0.20 สำหรับอัตราส่วนโพซอง ของคอนกรีตน้ำหนักธรรมดาที่มีกำลังอัดระหว่าง 55 ถึง 80 MPa (560 ถึง 815 ksc) มีค่าระหว่าง 0.20 ถึง 0.28 และมีแนวโน้มว่าจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนโพซองที่หาโดยวิธีแบบจลน์ (Poisson's Ratio By Dynamic Measurement) ของคอนกรีตที่มีกำลังอัดระหว่าง 17 ถึง 79 MPa (173 ถึง 805 ksc) มีค่าเท่ากับ 0.23 ถึง 0.32 นอกจากนี้ยังมีรายงานค่าอัตราส่วนโพซองของคอนกรีตจะอยู่ในช่วง 0.15 ถึง 0.22 โดยคอนกรีตกำลังสูงจะมีค่าอยู่ช่วงต่ำแต่ทั้งนี้ความแตกต่างจะไม่มากนักและพอสรุปได้ว่าค่าอัตราส่วนโพซองในช่วงอีลาสติกของคอนกรีตกำลังสูงและกำลังธรรมดามีค่าไม่แตกต่างกัน

ฉ. โมดูลัสแตกร้าวโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture) ของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้มวลรวมปกติและมวลรวมเบา มีค่าอยู่ระหว่าง  $7.5 \sqrt{f'c}$  ถึง  $12 \sqrt{f'c}$  เมื่อโมดูลัสแตกร้าวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ACI 363 ได้เสนอให้ใช้สมการต่อไปนี้ในการหาค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตคือ

$$f'c = 11.7 \sqrt{f'c} \text{ lb/in}^2 \text{ เมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดระหว่าง } 3,000 \text{ ถึง } 12,000 \text{ lb/in}^2$$

หรือใช้  $f'c = 0.94 \sqrt{f'c} \text{ ksc}$  เมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดระหว่าง 21 ถึง 83 ksc

ข. คุณสมบัติอื่นๆ โดยทั่วไปพบว่าคุณสมบัติด้านอื่นๆ ของคอนกรีตกำลังสูงจะไม่แตกต่างจากคอนกรีตธรรมดามากนักการหดตัวแห้งและการนำความร้อนของคอนกรีตกำลังสูงและคอนกรีตกำลังธรรมดา มีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้การใช้คอนกรีตกำลังสูงทำเป็นเสาของอาคารไม่พบปัญหาในเรื่องของการคืบที่มากกว่าปกติ อัตราการเพิ่มกำลังอัดในคอนกรีตกำลังสูงจะมีค่าสูงกว่าอัตราเพิ่มในคอนกรีตกำลังต่ำในช่วงอายุต้นแต่จะไม่แตกต่างกันเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น เช่น คอนกรีตกำลังสูงที่อายุ 7 วัน มีกำลังอัดเป็นร้อยละ 80 ถึง 90 ของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน แต่มีค่าเป็นร้อยละ 70 ถึง 75 ที่อายุเดียวกันเมื่อเป็นคอนกรีตกำลังธรรมดา

## 2.2.2 การใช้คอนกรีตกำลังสูงในงานก่อสร้าง

การใช้คอนกรีตกำลังสูงจะทำให้ห้องค้ออาคารมีขนาดเล็กลงทำให้ได้พื้นที่ใช้สอยมากขึ้น และลดน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ตัวของอาคารลง ทั้งนี้จะต้องคำนึงถึงด้านเศรษฐศาสตร์ด้วยเพราะราคาของคอนกรีตกำลังสูงสูงกว่าและต้องการการควบคุมงานที่ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา

ก. การใช้คอนกรีตกำลังสูงในงานอาคาร คอนกรีตกำลังสูงส่วนใหญ่ใช้ในการก่อสร้างอาคารโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอาคารสูงและนิยมใช้มากในเสาของอาคารสูงมากกว่าในส่วนอื่นของอาคาร เพราะสามารถลดพื้นที่หน้าตัดของเสาทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากเนื้อที่ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การใช้คอนกรีตกำลังสูงจะสามารถลดปริมาณของเหล็กเสริมในเสาได้ทำให้ประหยัดค่าเหล็กเสริมได้ นอกจากนิยมใช้เสาในอาคารสูงแล้วยังใช้ทำเป็นพื้นหรือคานของอาคารด้วยเพื่อลดขนาดของคานและพื้นที่น้ำหนักที่ลดลงหรือใช้สำหรับคานที่มีช่วงยาวซึ่งไม่สามารถทำได้ในกรณีที่ใช้คอนกรีตกำลังต่ำแต่การใช้คอนกรีตกำลังสูงในคานหรือพื้นอาจไม่ประหยัดเท่ากับกรณีที่ใช้ในเสาของอาคารสูง

ข. การใช้คอนกรีตกำลังสูงในงานสะพาน มีการใช้คอนกรีตกำลังสูงในการทำเป็นคานคอนกรีตอัดแรงของสะพานจำนวนมาก เนื่องจากสามารถลดปริมาณคอนกรีตและน้ำหนักของสะพานลงทำให้สามารถสร้างสะพานที่มีความยาวได้มากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ร่วมกับคอนกรีตอัดแรงซึ่งอาจเป็นแบบดึงเหล็กที่หลังหรือแบบดึงเหล็กก่อนก็ได้ นอกจากนี้ยังใช้ทำตอม่อของสะพานเพราะสามารถลดขนาดและคอนกรีตกำลังสูงมีค่าการซึมผ่านของน้ำต่ำ ดังนั้นจึงช่วยลดปัญหาการกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมีได้ดีกว่าการใช้คอนกรีตกำลังธรรมดาทำให้อายุการใช้งานของตอม่อสะพานนานขึ้น

นอกจากนี้ยังมีการนำคอนกรีตกำลังสูงไปใช้ในงานอื่นอีก เช่น ใช้ทำเป็นเขื่อนกันน้ำที่มีรูปทรงโค้งและเป็นโครงสร้างเปลือกบางทำเป็นหลังคาและพื้นของโรงงาน เป็นต้น

### 2.3 สารเคมีผสมเพิ่ม

การทำคอนกรีตกำลังสูงต้องใช้สารเคมีผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้เหมาะสมกับการใช้งานและลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้ต่ำลงเพื่อให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้น สารเคมีพื้นฐาน ได้แก่ สารลดปริมาณน้ำและสารลดน้ำพิเศษ เพื่อลดปริมาณน้ำในส่วนผสมและเพิ่มความสามารถเทได้ของคอนกรีต สารเคมีผสมเพิ่มอาจใช้ร่วมกับสารเคมีประเภทอื่นๆ เช่น สารกักกระจายฟองอากาศ สารหน่วงการก่อตัว หรือสารเร่งการก่อตัว เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การใช้สารเคมีผสมเพิ่มในคอนกรีตกำลังสูงควรตรวจสอบก่อนว่าสารเคมีผสมเพิ่มดังกล่าวสามารถใช้ร่วมกันได้ดีกับปูนซีเมนต์ที่ใช้ สารเคมีดังกล่าวยังไม่หมดอายุ และสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงได้ตามที่ต้องการโดยสามารถแบ่งได้ดังนี้คือ

**2.3.1 ประเภท A สารลดปริมาณน้ำ (Water Reducers หรือ Plasticizers)** หมายถึง สารเคมีผสมเพิ่มซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตแล้วสามารถลดปริมาณน้ำต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีตได้โดยที่ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตคงเดิม

**2.3.2 ประเภท B สารหน่วงการแข็งตัว (Retarders)** หมายถึง สารเคมีผสมเพิ่มซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตแล้ว ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตยาวนานขึ้น

**2.3.3 ประเภท C สารเร่งการก่อตัว (Accelerators)** หมายถึง สารเคมีผสมเพิ่มซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตสั้นลง

**2.3.4. ประเภท D สารลดน้ำ และ หน่วงการก่อตัว (Water Reducing And Set Tetarding Admixtures)** หมายถึง สารเคมีผสมเพิ่มซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตแล้ว สามารถลดปริมาณน้ำต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีต โดยความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตคงเดิมและทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตยาวนานขึ้น

**2.3.5. ประเภท E สารลดน้ำและเร่งการก่อตัว (Water Reducing And Set Accelerating Admixtures)** หมายถึง สารเคมีผสมเพิ่มซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตแล้วสามารถลดปริมาณน้ำต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีตโดยที่ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตคงเดิมและทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตสั้นลง

**2.3.6. ประเภท F สารลดน้ำระดับสูง (High Range Water Reducing Admixtures หรือ Super plasticizer)** หมายถึง สารเคมีผสมเพิ่มซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตแล้ว สามารถลดปริมาณน้ำต่อหน่วยปริมาตรคอนกรีตได้อย่างน้อยร้อยละ 12 โดยที่ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตคงเดิม

**2.3.7. ประเภท G สารลดน้ำระดับสูงและหน่วงการแข็งตัว (High Range Water Reducing And Set Retarding Admixture หรือ Set teetering Super plasticizer)** หมายถึง สารเคมีผสมเพิ่มซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตแล้วสามารถลดปริมาณน้ำต่อหน่วยปริมาตรคอนกรีตได้อย่างน้อยร้อยละ 12 โดยที่ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตคงเดิมและระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตยาวนานขึ้น

### 2.3.8. ประเภทอื่นๆ

- สารป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริม
- สารกันซึม
- สารกักกระจายฟองอากาศ (Air Entraining Agents)
- สารเพิ่มความหนืด (Thickening)
- สารผสมเพิ่มเพื่อช่วยในการปั๊มคอนกรีต (Pumping Aids)

## 2.4 วัสดุชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) หมายถึง พืชและสัตว์ที่เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญของโลกและถูกจัดเป็นพลังงานทดแทนซึ่งพลังงานจากฟอสซิลซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้แบ่งชีวมวลตามแหล่งที่มาได้ดังนี้

**2.4.1 พืชผลทางการเกษตร (Agricultural crops)** เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวฟ่างหวาน ที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต แป้งและน้ำตาล รวมถึงพืชน้ำมันต่างๆ ที่สามารถนำน้ำมันมาใช้เป็นพลังงานได้

**2.4.2 เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (Agricultural residues)** เช่น ฟางข้าว เศษลำต้นข้าวโพด ชังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง

**2.4.3 ไม้และเศษไม้ (Wood and wood residues)** เช่น ไม้โตเร็ว ยูคาลิปตัส กระจับปี่ กระจับปี่ เศษไม้จากโรงงานผลิตเครื่องเรือน และโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ เป็นต้น

**2.4.4 ของเหลือจากจากอุตสาหกรรมและชุมชน (Waste streams)** เช่น กากน้ำตาลและขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล แกลบ ชี้อ้อย เส้นใยปาล์ม และกะลาปาล์ม

**พลังงานชีวมวล (Bio-energy)** หมายถึง พลังงานที่ได้จากชีวมวลชนิดต่างๆ ดังที่กล่าวแล้วข้างต้น โดยกระบวนการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่างๆ มีดังนี้คือ

- การเผาไหม้โดยตรง (Combustion) เมื่อชีวมวลมาเผาจะได้รับความร้อนออกมาตามค่าความร้อนของชนิดชีวมวลความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูงไอน้ำนี้จะถูกนำไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป

ตัวอย่างชีวมวลประเภทนี้คือ เศษวัสดุทางการเกษตร และเศษไม้

- การผลิตก๊าซ (Gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เรียกว่า แก๊สชีวภาพ (Biogas) มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ สามารถนำไปใช้สำหรับกังหันแก๊ส (Gas Turbine)

- การหมัก (Fermentation) เป็นการนำชีวมวลมาหมักด้วยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศชีวมวลจะถูกย่อยสลายและแตกตัวเกิดแก๊สชีวภาพ (Biogas) ที่มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทนใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้านอกจากนี้สามารถใช้ขยะอินทรีย์ชุมชน มูลสัตว์ น้ำเสียจากชุมชนหรืออุตสาหกรรมเกษตรเป็นแหล่งวัตถุดิบชีวมวลได้

- การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืชมีกระบวนการที่ใช้ผลิตตั้งนี้กระบวนการทางชีวภาพทำการย่อยสลายแป้ง น้ำตาล และเซลลูโลสจากพืชทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวฟ่างหวาน กากน้ำตาล และเศษลำต้นอ้อยให้เป็นเอทานอลเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์เบนซิน

กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี โดยสกัดน้ำมันออกจากพืชน้ำมันจากนั้นนำน้ำมันที่ได้ไปผ่านกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification) เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล

กระบวนการใช้ความร้อนสูง เช่น กระบวนการไพโรไลซิส เมื่อวัสดุทางการเกษตรได้รับความร้อนสูงในสภาพไร้ออกซิเจนจะเกิดการสลายตัวเกิดเป็นเชื้อเพลิงในรูปของเหลวและแก๊สผสมกัน พลังงานชีวมวล ได้แก่ เอทานอลและไบโอดีเซล

## 2.5 เถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมัน [1] (Palm Oil Fuel Ash) เป็นวัสดุพลอยได้จากการนำกากของผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใยและทลายปาล์มเปล้าของผลปาล์ม เผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำ เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ามีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ประมาณ 800-900 องศาเซลเซียสข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรและสหกรณ์ พบว่าในปี พ.ศ. 2544 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มประมาณ 1,457,000 ไร่และมีผลผลิตเป็นอันดับ 4 ของโลกประมาณ 4,089,000 ตันต่อปี ทำให้กากของผลปาล์มมีปริมาณที่สูงตามผลผลิตปาล์มหรือประมาณ 2,147,000 ตันต่อปี และหลังจากการเผาพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูงถึง 107,000 ตันต่อปี เถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นผงฝุ่น น้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่ายเถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปีส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้งทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งตามมา เช่น ปัญหาด้านสภาวะแวดล้อม เป็นต้น

**2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน** องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่ามีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกับเถ้าแกลบและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้แต่มีปริมาณที่น้อยกว่า คือ ปริมาณร้อยละ 60-70 มีผลรวมของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ปริมาณร้อยละ 70 มีปริมาณ  $\text{SO}_3$  ต่ำกว่าร้อยละ 4 และปริมาณ LOI ร้อยละ 10 ซึ่งถือว่าค่อนข้างสูงคือประมาณร้อยละ 10 ซึ่งปริมาณ LOI ที่อยู่ในเถ้าปาล์มส่วนใหญ่จะเป็นถ่านที่ดูดำมากทำให้ต้องการน้ำในส่วนผสมคอนกรีตหรือมอร์ตาร์มากขึ้นและหาก LOI มากๆ (มากกว่าร้อยละ 20) จะส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีการรับกำลังต่ำลงได้ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่สูงมากและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาที่สั้นเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มตามมาตรฐาน ASTM C618 พบว่าเถ้าปาล์มมีองค์ประกอบทางเคมีที่ตรงกับข้อกำหนดของวัสดุปอซโซลาน Class N ได้แม้ว่าเถ้าปาล์มน้ำมันจะถือได้ว่าเป็นวัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (เพราะได้จากการเผากากของผลปาล์มน้ำมัน) ซึ่งแตกต่างจาก ASTM C618 ที่ระบุว่าวัสดุปอซโซลาน Class N เป็นวัสดุจากธรรมชาติ

**2.5.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าปาล์มน้ำมัน** ลักษณะอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนและหลังบด พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ผิวขรุขระ ความพรุนสูง รูปร่างกลมมนติดต่อกันเป็นกลุ่มก้อน และขนาดไม่สม่ำเสมอ ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันหลังบดมีลักษณะอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน อนุภาคมีขนาดและความพรุนลดลงเมื่อเทียบกับเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรงมีความละเอียดและมีอนุภาคที่ใหญ่มาก ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อย การบดจึงเป็นการเพิ่มความละเอียดของเถ้าปาล์ม และเป็นการ



เพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าปาล์มน้ำมันการบดไม่เพียงเพิ่มความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันแต่ยังเป็นการลดความพรุนของเถ้าปาล์มน้ำมันอีกด้วย

**2.5.3 ผลกระทบของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อคอนกรีตสด** เถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดมีความพรุนน้อยกว่าเถ้าแกลบบดละเอียดที่มีขนาดเท่ากัน ดังนั้นการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในการทดแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่ทำให้ความต้องการน้ำในส่วนผสมเปลี่ยนแปลง หรืออาจเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม หรือในกรณีของการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดที่มีความต้องการน้ำในส่วนผสมคอนกรีตที่เพิ่มมากกว่าอย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรง (ไม่มีการบดให้ละเอียดขึ้น) ในการผสมคอนกรีตจะใช้ปริมาณน้ำที่มากเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมเนื่องจากการดูดน้ำของเถ้าปาล์มน้ำมัน นอกจากนี้การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงในส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงทำให้ต้องใช้สารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้นด้วย ระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเป็นเช่นเดียวกับกรณีของวัสดุปอร์ตโซลานทั่วไป

## 2.6 เถ้าขานอ้อย

เถ้าขานอ้อย [1] (Bagasse Ash) เป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลซึ่งใช้ขานอ้อยและใบอ้อยเผาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าโดยกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จะนำไปใช้สำหรับอุตสาหกรรมภายในโรงงานและส่วนที่เหลือสามารถขายให้แก่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ปีพ.ศ. 2545 พบว่าประเทศไทยมีผลผลิตอ้อยทั้งหมดประมาณ 74 ล้านตัน และหลังจากกระบวนการผลิตน้ำตาลมีกากอ้อยประมาณ 21 ล้านตัน และหลังจากการเผากากอ้อยเหล่านี้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าแล้วพบว่าได้เถ้าขานอ้อยประมาณ 0.8 ล้านตัน เถ้าขานอ้อยที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้ามีการนำไปใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อย เช่น เกษตรกรนำไปใช้เป็นปุ๋ยเพื่อปรับสภาพดินในงานเกษตรกรรม แต่ส่วนใหญ่ของเถ้าขานอ้อยต้องนำไปทิ้งโดยไม่เกิดประโยชน์

**2.6.1 ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าขานอ้อย** เถ้าขานอ้อยมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูพรุนสูง โดยมีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า 30 ไมครอนขึ้นไปเมื่อบดเถ้าขานอ้อยให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นลักษณะอนุภาคคล้ายกันกับเถ้าแกลบหรือเถ้าปาล์มน้ำมัน หลังผ่านการบดทั่วไป คือ เป็นเหลี่ยมมุมรูปร่างไม่แน่นอน อนุภาคมีขนาดและความพรุนลดลงเมื่อเทียบกับเถ้าขานอ้อยก่อนบดสำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยพบว่าเถ้าขานอ้อยมี  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบหลักเหมือนกับเถ้าแกลบบดละเอียดและเถ้าปาล์มน้ำมันโดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 65-75 มีปริมาณ  $\text{SO}_3$  ต่ำ แต่มีปริมาณของ LOI ค่อนข้างสูงซึ่งอาจสูงถึงร้อยละ 20-30 การที่ LOI ของเถ้าขานอ้อยมีค่าค่อนข้างสูงมักเกิดขึ้นเช่นเดียวกับเถ้าชีวมวลทั่วไป

**2.6.2 ผลกระทบของเถ้าขานอ้อยต่อคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว** การแทนที่เถ้าขานอ้อยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าขานอ้อยเพิ่มขึ้น 10 เช่นเดียวกับใช้วัสดุปอซโซลานชนิดอื่นๆ คอนกรีตที่ใช้เถ้าขานอ้อยแทนที่มวลรวมละเอียดมีความสามารถในการทำงาน (Workability) และการเยิ้มที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อยมีความสามารถต้านทานการสึกกร่อน การซึมผ่านน้ำ การต้านทานคลอไรด์และการ

เกิดการบอบเนชันเหมือนกับคอนกรีตธรรมดา นอกจากนี้ความพรุนของเถ้าชานอ้อยทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการแข็งตัวและละลายของน้ำ (Freezing and Thawing) สลับกันได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา การศึกษาเถ้าชานอ้อยเพื่อนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการทำคอนกรีตที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า เถ้าชานอ้อยมีศักยภาพสูงที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ และมีปริมาณมากพอที่อาจสามารถพัฒนาในเชิงพาณิชย์ได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามความรู้เกี่ยวกับเถ้าชานอ้อยยังค่อนข้างจำกัด เช่นในด้านความคงทนรวมถึงคุณสมบัติของเถ้าชานอ้อยในแต่ละแหล่งผลิต ซึ่งมีคุณสมบัติของเถ้าชานอ้อยที่แตกต่างกันอาจทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนไป จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อนำข้อมูลเหล่านั้นมาใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของเถ้าชานอ้อยที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานคอนกรีตต่อไป

## 2.7 การบ่มคอนกรีต

การบ่ม (Curing) คือ วิธีที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง วิธีการทำโดยให้น้ำแก่คอนกรีตหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว หน้าที่สำคัญของการบ่มคอนกรีตมีด้วยกัน 2 ประการ คือ การป้องกันการสูญเสียน้ำจากความชื้นจากเนื้อคอนกรีต และการรักษาระดับอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม สำหรับวัตถุประสงค์ที่สำคัญของการบ่มคอนกรีต คือ เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังและความทนทาน และเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต โดยรักษาระดับอุณหภูมิให้เหมาะสม และลดการระเหยของน้ำให้น้อยที่สุดกรรมวิธีการบ่ม เราแบ่งกรรมวิธีการบ่มออกเป็น 2 ชนิดตามสภาพอุณหภูมิใช้บ่มคือ

**2.7.1 การบ่มที่อุณหภูมิปกติ** สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือการเพิ่มความชื้นและการป้องกันความชื้น

1. การเพิ่มความชื้น โดยให้ความชื้นอย่างต่อเนื่องของคอนกรีตโดยตรงในระยะแรกๆที่คอนกรีตแข็งตัว วิธีนี้นอกจากจะเป็นวิธีบ่มที่ดีแล้วยังสามารถช่วยลดอุณหภูมิที่ผิวคอนกรีตลงด้วยจึงเหมาะกับคอนกรีตที่เทในอากาศร้อน

2. วิธีป้องกันการเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต วิธีนี้เป็นการป้องกันความชื้นจากผิวคอนกรีตมิให้เล็ดลอดออกสู่ภายนอกการป้องกันความชื้นวิธีนี้ได้แก่ การใช้กระดาษกันน้ำ ผ้าพลาสติก หรือสารเคมี เป็นต้น อย่างไรก็ตามไม้แบบที่ยังไม่ถอดก็สามารถป้องกันการเสียน้ำความชื้นได้เช่นกัน

**2.7.2 การบ่มที่อุณหภูมิสูง** เป็นการบ่มที่สามารถเร่งอัตราการเพิ่มกำลังได้อย่างรวดเร็วเป็นที่ยอมรับการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป เช่น ท่อ คาน และพื้น เป็นต้น ข้อดีในการปฏิบัติ คือ สามารถผลิตได้รวดเร็วขึ้น ประหยัดแบบหล่อเพราะสามารถถอดแบบได้เร็ว คอนกรีตมีกำลังสูงเร็ว ทนต่อการเคลื่อนย้ายและใช้งาน

**2.7.3 การบ่มด้วยไอน้ำที่ความกดดันต่ำ (Low Pressure Steam Curing)** อุณหภูมิที่ใช้อยู่ระหว่าง 40–100 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิที่ผลิตที่สุดจะอยู่ระหว่าง 65–80 องศาเซลเซียส การเลือกอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มกำลังและกำลังสูงสุดที่ต้องการอุณหภูมิสูงจะทำให้กำลังสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและกำลังประลัยสูงสุดจะมีค่าต่ำ อุณหภูมิที่ต่ำทำให้กำลังประลัยสูงสุดที่สูงแต่ด้วยอัตราการเพิ่มกำลังที่ต่ำ นอกจากอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้บ่มแล้ว สิ่งที่สำคัญก็คือ เวลาที่ใช้ในการบ่มซึ่ง

ประกอบด้วยช่วงเวลาการค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเวลาที่อุณหภูมิสูงสุดจริงและการลดอุณหภูมิลงสู่อุณหภูมิปกติควรทิ้งคอนกรีตไว้ที่อุณหภูมิปกติประมาณ 2-6 ชั่วโมงหลังการหล่อก่อนที่จะสัมผัสกับไอน้ำ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นก่อนอัดการเพิ่มของอุณหภูมิไม่ควรให้เกิน 30 องศาเซลเซียส / ชั่วโมง เวลาที่คอนกรีตอยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงสุดเป็นสิ่งกำหนดปริมาณกำลังที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กับผลคูณระหว่างเวลาและอุณหภูมิ ทั้งนี้ควรใช้อัตราการลดอุณหภูมิระหว่าง 20-30 องศาเซลเซียส / ชั่วโมง

**2.7.4 การบ่มด้วยไอน้ำที่ความกดดันสูง (High Pressure Steam Curing)** หากต้องการบ่มคอนกรีตด้วยอุณหภูมิเกิน 100 องศาเซลเซียส เราต้องให้ความกดดันสูงขึ้นและต้องบ่มคอนกรีตในภาชนะที่ปิดสนิทซึ่งมีชื่อว่า Autoclave อุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ในช่วง 160-210 องศาเซลเซียสมีความดัน 6-20 atm สารประกอบที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีภายใต้สภาวะดังกล่าวมีคุณสมบัติต่างจากสารซึ่งบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียสและมีผลที่สำคัญ คือสามารถใช้คอนกรีตได้ภายใน 24 ชั่วโมงเพราะคอนกรีตมีกำลังสูงทัดเทียมการบ่มปกติเป็นเวลา 28 ชั่วโมง มีการหดตัวและการล้าลดลงมากทนเกลือซัลเฟตได้ดีขึ้นกำจัด Efflorescence มีความชื้นต่ำภายหลังการบ่ม

## 2.8 พลังงานไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงมากถึง 2,450 ล้านรอบต่อวินาทีที่มีลักษณะคล้ายกับคลื่นวิทยุแต่มีความถี่ที่สูงกว่า หัวใจสำคัญของเตาไมโครเวฟ คือตัวแม่กึ่งตัวนำที่将成为ตัวเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นไมโครเวฟซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ เพราะคลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นความถี่สูงมิใช่รังสีจึงไม่กระจายและสะสมในร่างกายมนุษย์ระบบการทำงานของเตาไมโครเวฟ คลื่นไมโครเวฟจะพุ่งเข้าสู่อาหารจากทุกทิศทางโดยรอบของผนังเตาด้านในแล้วแผ่กระจายไปสู่อาหาร เมื่อคลื่นไปกระทบอาหารทำให้โมเลกุลของอาหารเกิดการสั่นและเสียดสีกันก่อให้เกิดเป็นพลังงานความร้อนทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็ว ลักษณะเช่นเดียวกับที่เราใช้มือถูกันไปมาเร็วๆ จะรู้สึกร้อนขึ้นมาทันที จากคุณสมบัติเด่นของคลื่นไมโครเวฟที่ทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็วจึงเป็นการรักษาคุณค่าของอาหารไว้อย่างครบถ้วน ไม่ว่าจะเป็นการหุง ต้ม อบ นึ่ง ปิ้ง ย่าง ทอด และคุณสมบัติพิเศษที่ได้รับมากกว่าการประกอบอาหารด้วยวิธีดั้งเดิมหลายประการ อาทิ ความสะอาดรวดเร็ว ประหยัด ปลอดภัย และไร้เขม่าควันไฟ

**2.8.1 หลักการให้ความร้อน** การประกอบอาหารด้วยเตาไมโครเวฟนี้ แตกต่างจากการประกอบอาหารด้วยเตาอบธรรมดา คือเตาอบธรรมดาให้พลังงานความร้อนโดยเปลวไฟแบบเตาอบแก๊สหรือความร้อนจากขดลวดไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้อาหารสุกโดยการถ่ายเทความร้อน คือการนำ การพาและการแผ่รังสี แต่เตาไมโครเวฟทำให้อาหารสุกโดยคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงทำให้โมเลกุลของน้ำในอาหารเกิดการสั่นสะเทือนและชนโมเลกุลอื่นๆ ต่อไปจนเกิดเป็นพลังงานจลน์และพลังงานจลน์นี้เองจะกลายเป็นพลังงานความร้อนจึงทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็วและเร็วกว่าการประกอบอาหารด้วยระบบอื่นๆ โดยไม่เสียพลังงานความร้อน

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**จตุวุฒิ สตินาวินสุทธิ์ และคณะ [2]** ได้ทำการศึกษาการพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงตามเป้าหมายที่อายุ 24 ชั่วโมง โดยเลือกกำลังรับแรงอัดให้อยู่ในช่วง 400-600 ksc และคอนกรีตสดมีค่าการยุบตัวไม่น้อยกว่า 5 cm โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซิลิกาฟูม หินบะซอลท์ขนาด 3/8 นิ้ว ทรายแม่น้ำ สารลดน้ำพิเศษประเภท F การทดสอบใช้ส่วนผสมพื้นฐาน 5 กลุ่มแต่ละกลุ่มใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์ 4 ค่าระหว่าง 0.24 – 0.45 ซึ่งจากการพบว่ากำลังรับแรงอัดช่วง 400-600 ksc ที่อายุ 24 ชั่วโมงสามารถใช้ส่วนผสมต่อลูกบาศก์เมตรที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 580 kg ซิลิกาฟูม 65 kg (11.21% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์) สารลดน้ำพิเศษ 18 kg (3.10% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์) หิน 980 kg และปรับทรายตามปริมาณน้ำผลการทดสอบสามารถแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์ 5 กราฟ จากกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถอ่านค่ากำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต้องการได้ โดยกำลังรับแรงอัดที่ 400 ksc ใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.312 และปรับทรายเป็น 590 kg/m<sup>3</sup> และกำลังรับแรงอัดที่ 600 ksc ใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.26 และปรับทรายเป็น 680 kg/m<sup>3</sup>

**อภิเดช หล้าปັນ และคณะ [3]** ได้ทำการศึกษาการพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงที่อายุ 24 ชั่วโมง โดยใช้ซิลิกาฟูม แก้วถ่านหิน ทรายแม่น้ำ หิน สารลดน้ำพิเศษประเภท F สารเร่งการก่อตัวประเภท C การทดสอบใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.16, 0.18 และ 0.20 การบ่มคอนกรีตใช้การบ่มด้วยน้ำและการบ่มด้วยไอน้ำ โดยใช้ระยะเวลาในการบ่ม 18, 19 และ 20 ชั่วโมง หลังจากแกะแบบที่อายุ 5, 4 และ 3 ชั่วโมงตามลำดับซึ่งจากการทดสอบพบว่าที่อัตราส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.20 ซิลิกาฟูม 23 เปอร์เซ็นต์ใช้สารลดน้ำพิเศษ 2 เปอร์เซ็นต์ ใช้สารเร่งการก่อตัว 1.5 เปอร์เซ็นต์ และบ่มด้วยไอน้ำเป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง จะทำให้กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 24 ชั่วโมงสูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 1044 ksc

**ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ และคณะ [4]** ได้ทำการศึกษาการบ่มคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องโดยทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่เกิดขึ้นระหว่างการบ่มคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟและการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่เกิดขึ้นผลที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตซึ่งผ่านการบ่มในน้ำและอากาศโดยตัวแปรที่ใช้คือ จำนวนแมกนีตรอน (กำลังวัตต์) ระยะเวลาในการบ่มและสัดส่วนผสมของคอนกรีตซึ่งเกิดจากองค์ประกอบระหว่างซีเมนต์ น้ำ ทราย และหิน นอกจากนั้นยังมีอิทธิพลของปริมาณอากาศและสารผสมเพิ่มชนิดสารหน่วงการก่อตัวจากผลการศึกษาพบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถช่วยเร่งพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นโดยไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

**พงศธร จันทรตรี [5]** ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าขานอ้อย โดยศึกษากำลังอัด กำลังดึง โมดูลัสยืดหยุ่น กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม และอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าขานอ้อยซึ่งมีค่า W/B เท่ากับ 0.5 และ 0.3 ซึ่งผลจากการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตกำลังปกติและกำลังสูงได้โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถพัฒนากำลังอัด กำลังดึง โมดูลัสยืดหยุ่น กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมให้มีค่ากำลังสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุตั้งแต่ 7 วัน ส่วนอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยใน

อัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสานส่งผลให้ค่าอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน ทั้งนี้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานส่งผลให้ค่ากำลังอัดและกำลังดึงมีค่าสูงสุด

กล่าวโดยสรุป ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยต้องการที่จะศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าขานอ้อยเป็นส่วนผสมและนำคอนกรีตกำลังสูงที่ได้ทำการบ่มด้วยเตาอบไมโครเวฟที่เวลาต่างๆ โดยได้คำนึงถึงองค์ประกอบที่ได้จากการศึกษางานวิจัยดังกล่าว สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้วัสดุดังนี้ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทราย หิน เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าขานอ้อย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากทางการเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และเกิดคุณค่ามากที่สุด และเพิ่มประสิทธิภาพให้กับคอนกรีตกำลังสูงมากยิ่งขึ้น

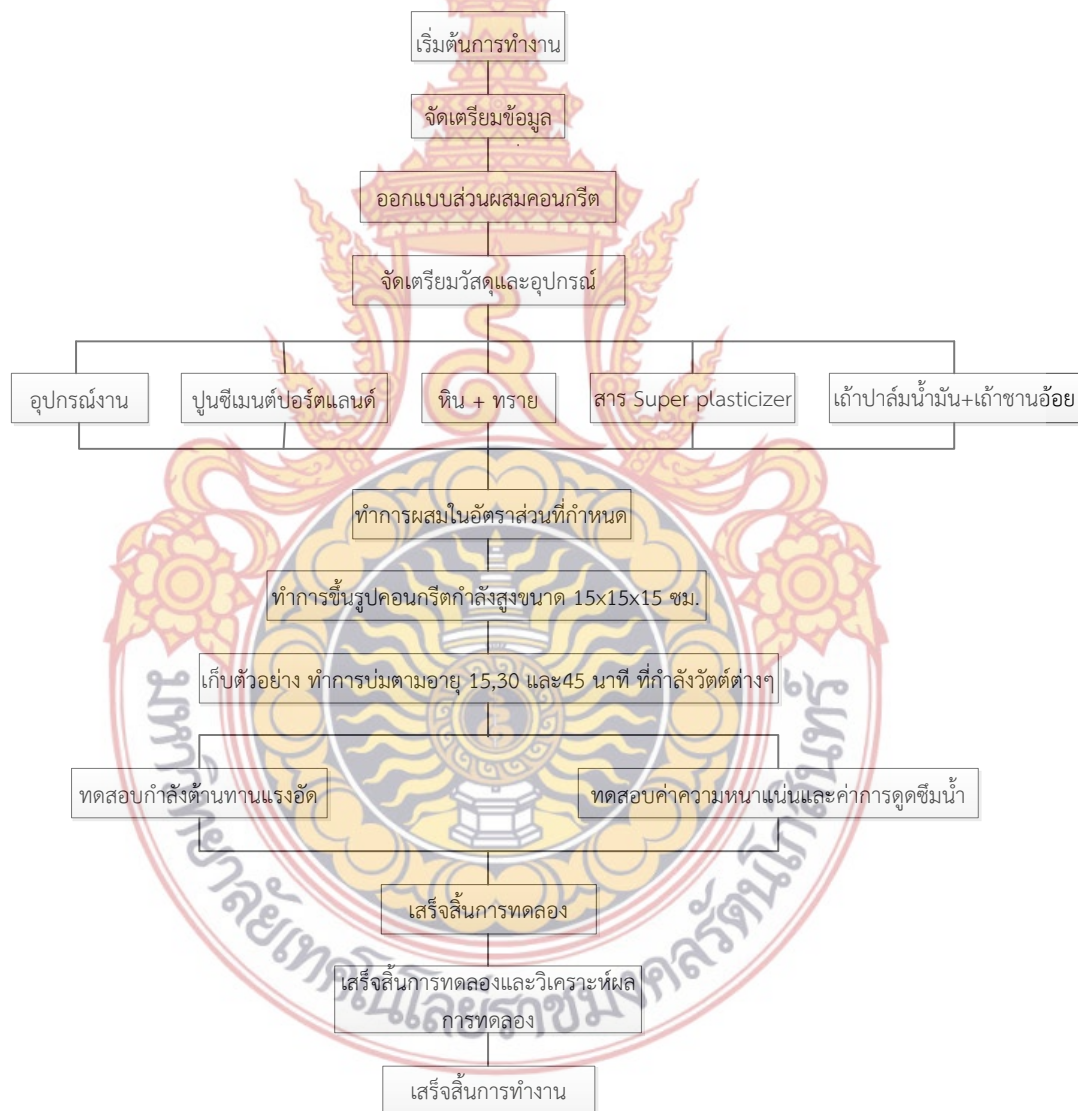


## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงการบ่มคอนกรีตกำลังสูงด้วยเตาอบไมโครเวฟที่ใช้วัสดุชีวมวลในการผสม โดยมุ่งศึกษาเกี่ยวกับการนำพลังงานความร้อนแต่ละความร้อน คือ กำลังวัตต์มาใช้ในการบ่มคอนกรีตกำลังสูงและของเหลือจากจากอุตสาหกรรมและชุมชนมาเป็นส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงโดยการศึกษาครอบคลุมตั้งแต่การจัดเตรียมวัสดุ การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต การทดสอบกำลังอัด และการดูดซึมน้ำ โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

#### 3.1 แผนผังการดำเนินการทำงาน



รูปที่ 3-1 แผนผังการดำเนินการทำงาน

จากรูปที่ 3-1 แผนผังการดำเนินการทำงาน ตั้งแต่เริ่มต้นของการทำงานวิจัยครั้งนี้จนถึงสิ้นสุดของการทำงานทั้งหมด โดยเริ่มตั้งแต่การจัดเตรียมข้อมูล ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งหมดแล้วทำการออกแบบสัดส่วนผสมตามที่ต้องการ ทำการผสมก้อนคอนกรีตและทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ที่ต้องการ ทราบจนถึงสิ้นสุดการทดสอบในครั้งนี้

### 3.2 การเตรียมข้อมูล

3.2.1. ศึกษาแหล่งข้อมูล จากตำรา วารสาร บทความ รายงานวิจัย วิทยานิพนธ์ และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 3.2.2. ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่จะนำมาเป็นส่วนผสมสำหรับคอนกรีตกำลังสูง

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement)
2. มวลรวมละเอียดหรือทราย
3. มวลรวมหยาบหรือหิน
4. สารลดน้ำพิเศษ
5. เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash)
6. เถ้าชานอ้อย (Bagasse Ash)

### 3.3 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูง

1. เลือกความสามารถเทได้และกำลังแรงอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 3-1 ค่าการยุบตัวที่ใช้ออกแบบในคอนกรีตกำลังสูง [1]

ชนิดของคอนกรีต	ค่าการยุบตัว (mm.)
คอนกรีตที่ไม่ใส่สารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์	50-100
คอนกรีตที่ใส่สารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ (สารลดน้ำพิเศษ)	25-50

## 2. เลือกขนาดใหญ่ที่สุดและปริมาณของมวลหยาบ

ตารางที่ 3-2 ขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมหยาบ [1]

กำลังอัดของคอนกรีต	ขนาดใหญ่ที่สุดและปริมาณของมวลหยาบ (mm)
ต่ำกว่า 62 เมกะปาสกาล (632 ksc)	20-25
สูงกว่า 62 เมกะปาสกาล (632 ksc)	10-12.5

## 3. ประมาณปริมาณน้ำและฟองอากาศ

ตารางที่ 3-3 ปริมาณน้ำและฟองอากาศ [1]

ค่ายุบตัวของคอนกรีต	ปริมาณน้ำ(kg/m <sup>3</sup> )			
	ขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมหยาบ (mm)			
	10	12.5	20	25
25-50	184	175	169	166
50-75	190	184	175	172
75-100	196	190	181	178
ปริมาณฟองอากาศ (%)				
คอนกรีตธรรมดา	3.0	2.5	2.0	1.5
คอนกรีตผสมสารซูเปอร์พลาสติกไซเซเซอร์	2.5	2.0	1.5	1.0



4. เลือกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

ตารางที่ 3-4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน [1]

กำลังอัด ภาคนาม (MPa)	อายุ (วัน)	W / (C+P)							
		คอนกรีตกำลังสูงที่ไม่ผสมสาร Super plasticizer				คอนกรีตกำลังสูงที่ผสมสาร Super plasticizer			
		ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ (mm)				ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ (mm)			
		10	12.5	20	25	10	12.5	20	25
48 (490 ksc)	28	0.42	0.41	0.40	0.39	0.50	0.48	0.45	0.43
	56	0.46	0.45	0.44	0.43	0.55	0.52	0.48	0.46
55 (560 ksc)	28	0.35	0.34	0.33	0.33	0.44	0.42	0.40	0.38
	56	0.38	0.37	0.36	0.35	0.48	0.45	0.42	0.40
62 (630 ksc)	28	0.30	0.29	0.29	0.28	0.38	0.36	0.35	0.34
	56	0.33	0.32	0.31	0.30	0.42	0.39	0.37	0.36

ตารางที่ 3-4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ต่อ) [1]

กำลังอัด ภาคสนาม (MPa)	อายุ (วัน)	W / (C+P)							
		คอนกรีตกำลังสูงที่ไม่ผสมสาร Super plasticizer				คอนกรีตกำลังสูงที่ผสมสาร Super plasticizer			
		ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ (mm)				ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ (mm)			
		10	12.5	20	25	10	12.5	20	25
69 (770 ksc)	28	0.26	0.26	0.25	0.25	0.33	0.315	0.31	0.30
	56	0.29	0.28	0.27	0.26	0.37	0.35	0.33	0.32
76 (775 ksc)	28	-	-	-	-	0.30	0.29	0.27	0.27
	56	-	-	-	-	0.33	0.31	0.29	0.29
83 (846 ksc)	28	-	-	-	-	0.27	0.26	0.25	0.25
	56	-	-	-	-	0.30	0.28	0.27	0.26

5. กำหนดหาปริมาณวัสดุประสาน
6. กำหนดส่วนผสมพื้นฐาน
7. กำหนดส่วนผสมคู่เคียง
8. การคำนวณน้ำหนักส่วนผสม
9. การทดลองผสมและปรับส่วนผสม
10. การใส่สารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์และปรับส่วนผสม
11. การทดสอบภาคสนามและการเลือกส่วนผสม

### 3.4 สัดส่วนที่เหมาะสมในการผสมคอนกรีตกำลังสูง

ตารางที่ 3-5 สัดส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูง ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ที่กำลังอัด 450 ksc

รายการ	ส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูง ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )						
	ปูนซีเมนต์	เถ้าปาล์ม น้ำมัน	เถ้าขาน อ้อย	หิน	ทราย	น้ำ	สารลดน้ำ พิเศษ
ส่วนผสมพื้นฐาน	563.33	0	0	1166.4	524.0	169	13.52
สัดส่วนที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันกับเถ้าขานอ้อยตามสัดส่วนต่างๆ							
5:15	450.664	28.167	84.499	1166.40	524.0	169	13.52
10:10	450.664	56.33	56.33	1166.40	524.0	169	13.52
15:5	450.664	84.499	28.167	1166.40	524.0	169	13.52

จากตารางการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงได้ออกแบบตาม ACI 211.4R ได้ให้แนวทางในการออกแบบคอนกรีตกำลังสูงซึ่งมีส่วนผสมของวัสดุชีวมวล ซึ่งการออกแบบคอนกรีตมีแนวทางคล้ายกับการออกแบบคอนกรีตกำลังธรรมดาโดยดูเรื่องกำลังรับแรงอัดและความสามารถในการเทได้ให้เป็นไปตามแนวทางที่ต้องการ

### 3.5 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือเครื่องใช้

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement)
2. มวลรวมละเอียดหรือทราย
3. มวลรวมหยาบหรือหิน
4. น้ำ
5. สารลดน้ำพิเศษ (High Range Water Reducing Admixtures หรือ Super Plasticizer)
6. เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash)
7. เถ้าชานอ้อย (Bagasse Ash)
8. ตะแกรงที่ใช้ร่อนทรายพร้อมถาดรอง
9. กระบอกตวงน้ำและตวงสารผสมเพิ่ม
10. เครื่องชั่งน้ำหนักมาตรฐาน
11. เครื่องมือในการลำเลียงส่วนผสมคอนกรีต
12. แบบหล่อคอนกรีตกำลังสูง
13. เครื่องทดสอบ
14. เต้าอบไมโครเวฟ

### 3.6 ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูง

#### 3.6.1 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [6] (Specific Gravity Of Portland Cement)

- 1) วัสดุประสงค์ เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และประโยชน์ในการใช้กำหนดสัดส่วนในการผสมคอนกรีต
- 2) เครื่องมือและวัสดุทดสอบ



รูปที่ 3-2 ปูนซีเมนต์



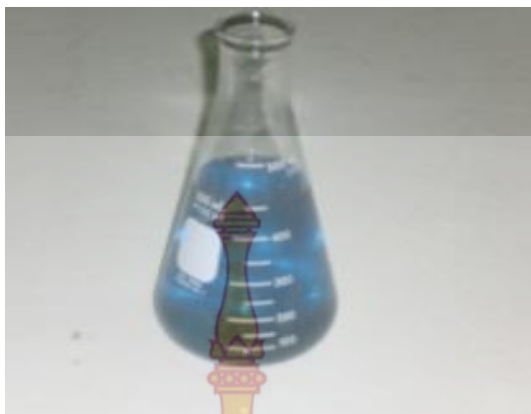
รูปที่ 3-3 ขวดแก้วทดลองเลอชาแตรีแอร์ (LeChatelier)



รูปที่ 3-4 เทอร์โมมิเตอร์



รูปที่ 3-5 กรวยก้านยาว



รูปที่ 3-6 น้ำมันก๊าด



รูปที่ 3-7 อ่างควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 3-8 เครื่องชั่งสามารถชั่งได้ละเอียด 0.1 กรัม

### 3) วิธีทดสอบ

- เติมน้ำมันก๊าดลงในขวดแก้วมาตรฐานเลอชาเตอร์รีแอร์จนถึงระดับระหว่าง 0-1 มิลลิลิตร ภายในขวดแก้วทดลองตอนบนเหนือระดับน้ำมันก๊าดจะต้องแห้ง
- ปิดปากขวดทดลองด้วยจุกแก้วแล้วนำไปจุ่มในถังที่มีอุณหภูมิคงที่และใกล้เคียงกัน

กับอุณหภูมิโดยให้นานพอที่จะอ่านค่าระดับได้ทั้งนี้เพื่อไม่ให้อุณหภูมิต่างกันเกิน 0.2 องศาเซลเซียส จะต้องตรวจสอบค่าระดับที่อ่านได้จนกว่าจะคงที่เพื่อให้แน่ใจว่าอุณหภูมิของน้ำมันก๊าดที่บรรจุในขวดแก้วทดลองเท่ากับอุณหภูมิของน้ำในถังแล้วจึงอ่านค่าระดับเป็นค่าแรก

- ชั่งปูนซีเมนต์ตัวอย่างทดสอบประมาณ 64 กรัมแล้วรอกลงไปในขวดแก้วทดลองลงทีละน้อยโดยใช้กรวยก้านยาวช่วยในการกรอกเพื่อป้องกันไม่ให้ปูนซีเมนต์เกาะบริเวณคอขวดแก้วทดลองเมื่อกรอกปูนซีเมนต์ตัวอย่างจนหมดหรือจนกระทั่งระดับน้ำมันก๊าดในขวดแก้วทดลองสูงพอที่จะอ่านสเกลตอนบนได้ให้หยุดกรอกปิดปากขวดแก้วทดลองด้วยจุกแก้วแล้วล้างขวดแก้วทดลองซ้ำๆ ในลักษณะเอียงบนพื้นโต๊ะหรือแกว่งเบาๆ ในแนวราบเป็นวงกลมเพื่อไล่ฟองอากาศออกจากปูนซีเมนต์จนกระทั่งไม่มีฟองอากาศลอยขึ้นมาจึงนำขวดแก้วทดลองนั้นจุ่มลงในถังน้ำตามวิธีในข้อ 2 จนระดับน้ำมันก๊าดในขวดแก้วทดลองคงที่จึงจะอ่านค่าเป็นระดับน้ำมันก๊าดครั้งหลัง

#### 4) วิธีการคำนวณ

- ปริมาตรของปูนซีเมนต์ คือปริมาตรที่ของเหลวถูกแทนที่หาได้จากผลต่างระหว่างค่าปริมาตรที่อ่านได้ครั้งหลังลบกับค่าปริมาตรที่อ่านได้ครั้งแรก

- การคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะให้คำนวณเป็นทศนิยม 3 ตำแหน่งแล้วปัดเศษเหลือ 2 ตำแหน่ง

A : ปริมาตรที่ถูกของเหลวแทนที่ครั้งแรก

B : ปริมาตรที่ถูกของเหลวแทนที่ครั้งหลัง

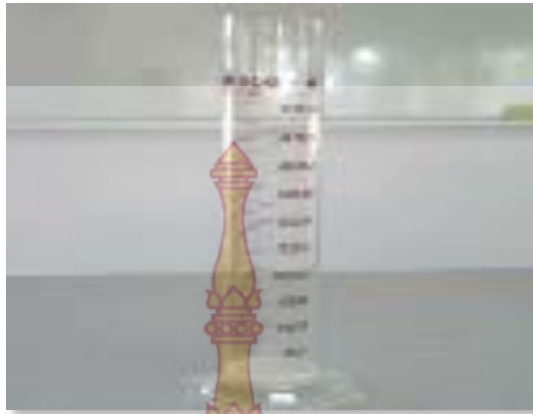
### 3.6.2 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด (Specific Gravity And Absorption Of Fine Aggregate)

1) วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ และคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด

#### 2) เครื่องมือและวัสดุทดสอบ



รูปที่ 3-9 เครื่องชั่งสามารถชั่งได้ละเอียด 0.1 กรัม



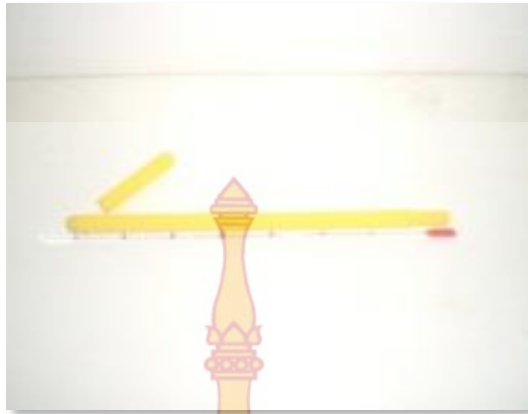
รูปที่ 3-10 ครอบอกตวงขนาดความจุ 500 มิลลิลิตร



รูปที่ 3-11 กรวยตัด

รูปที่ 3-12 ตู้บที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส





รูปที่ 3-13 เทอร์โมมิเตอร์



รูปที่ 3-14 ทรายประมาณ 1000 กรัม



รูปที่ 3-15 ถาดสแตนเลส

## 3) วิธีการทดลอง

- นำทรายตัวอย่างมาทำการแบ่งสี่แล้วอบที่อุณหภูมิ 110 ±5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นำทรายหนักประมาณ 1000 กรัมที่ได้จากวิธีการแบ่งสี่มาแช่ไว้ 24 ชั่วโมง
- นำทรายตัวอย่างที่แช่น้ำไว้แล้วมาเกลี่ยกระจายบนพื้นเรียบที่ไม่ดูดซึมน้ำใช้เครื่องเป่าลมเป่าให้ตัวอย่างสม่ำเสมอ หรือผึ่งแดดจนกระทั่งทรายอยู่ในสภาพอิมตัวผิวแห้ง
- ซึ่งตรวจสอบได้โดยนำทรายไปใส่กรวยโลหะซึ่งวางอยู่บนพื้นเรียบที่ไม่ดูดซึมน้ำแล้วใช้เหล็กกระทุ้ง 25 ครั้งโดยถือให้ปลายอยู่เหนือผิวทรายประมาณ 5 มิลลิเมตรแล้วปล่อยลงด้วยน้ำหนักตัวเองแล้วกรวยขึ้นตรงๆ ถ้าทรายยังคงเป็นรูปกรวยแสดงว่ายังมีความชื้นมากให้เป่าต่อไปจนกระทั่งเมื่อทดสอบแล้วปรากฏว่าทรายละลายลงมาโดยอิสระทรายในสภาพนี้ถือว่าอยู่ในสภาพอิมตัวผิวแห้ง (SSD) หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักขวด Volumetric Flask ที่เติมน้ำจนถึงขีด 500 มิลลิลิตร
- นำทรายมาชั่ง 500 กรัม ใส่ลงใน Volumetric Flask เติมน้ำลงในขวดจนเท่ากับระดับทรายแล้วทำการไล่ฟองอากาศในทรายออกให้หมดโดยการแกว่งไปมาในแนวราบเติมน้ำลงไปอีกจนถึงระดับ 500 มิลลิลิตรแล้วชั่งน้ำหนักทรายในขวด Volumetric Flask ทั้งหมดใส่ภาตหรือถ้วยที่ทนความร้อนแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 ±5 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่นำออกจากเตาอบทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง

## 4) การคำนวณ

- หาค่าความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk Specific Gravity) โดยใช้สูตรต่อไปนี้

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมแห้ง (Oven Dry)} = \frac{A}{(D+B-C)}$$

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมอิมตัวผิวแห้ง (SSD)} = \frac{B}{(D+B-C)}$$

$$\text{ความถ่วงจำเพาะที่ปรากฏ} = \frac{A}{(D+A-C)}$$

- การดูดซึมน้ำ (จากสภาพแห้ง) ของทรายอาจหาได้โดยใช้สูตรการดูดซึมน้ำ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ} = \frac{(A-B) \times 100\%}{A}$$

เมื่อ

- A น้ำหนักทรายแห้ง
- B น้ำหนักทรายในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง
- C น้ำหนักขวด Volumetric Flask + ทรายในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง + น้ำ
- D น้ำหนักขวด Volumetric Flask + น้ำ

### 3.6.3 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ (Specific Gravity And absorption Of Coarse Aggregate)

- 1) วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ และคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ
- 2) เครื่องมือและวัสดุทดสอบ ประกอบด้วย



รูปที่ 3-16 เครื่องชั่งสามารถชั่งได้ละเอียด 0.1 กรัม



รูปที่ 3-17 ตะกร้าสำหรับชั่งหินในน้ำ



รูปที่ 3-18 ตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร)



รูปที่ 3-19 ตู้บที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส



รูปที่ 3-20 เทอร์โมมิเตอร์



รูปที่ 3-21 หินประมาณ 5000 กรัม



รูปที่ 3-22 ถาดแสดนเลส

### 3) วิธีการทดลอง

- นำหินมาทำการแบ่งสีแล้วร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 4 แล้วนำส่วนที่ค้างมาอบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงหลังจากนั้นนำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักประมาณ 5000 กรัม แล้วนำไปแช่น้ำ 24 ชั่วโมง
- เหน้าที่แช่หินออกแล้วนำหินขึ้นมาเช็ดด้วยผ้าที่แห้งที่ละก้อนจนหินอยู่ในสภาพอิมตัวผิวแห้ง (SSD) ซึ่งสังเกตได้จากหินที่แห้งแต่ยังมีความชื้นอยู่แล้วนำไปชั่งน้ำหนักให้ละเอียด
- ทำการชั่งตะกร้าเปล่าในน้ำแล้ววัดอุณหภูมินำหินใส่ตะกร้าแล้วชั่งน้ำหนักในน้ำก่อนซึ่งควรสั้นตะกร้าเบาๆ เพื่อไล่ฟองอากาศและต้องให้ตะกร้ากับหินตัวอย่างจมอยู่ในน้ำขณะชั่ง
- นำหินตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่นำออกจากเตาอบปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง

### 4) การคำนวณ

- หาค่าความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk Specific Gravity) โดยใช้สูตรต่อไปนี้

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมแห้ง (Oven Dry)} = \frac{A}{(B-C)}$$

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมอิมั้วแห้ง (SSD)} = \frac{B}{(B-C)}$$

$$\text{ความถ่วงจำเพาะที่ปรากฏ} = \frac{A}{(A-C)}$$

- การดูดซึมน้ำ (จากสภาพแห้ง) ของทรายอาจหาได้โดยใช้สูตรการดูดซึมน้ำ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ} = \frac{(B-A) \times 100\%}{A}$$

เมื่อ

- A น้ำหนักของตัวอย่างอบแห้ง  
 B น้ำหนักของตัวอย่างในสภาวะอิมั้วแห้ง ซึ่งในอากาศ  
 C น้ำหนักของตัวอย่างซึ่งในน้ำ

### 3.6.4 การทดสอบความต้านทานต่อการขัดสีของมวลรวมโดยเครื่องลอสแอนเจลิส (Abrasion Test Of Course Aggregate By Use Of The Loss Angles Machine)

- 1) วัตถุประสงค์ เพื่อหาความต้านทานต่อการขัดสีของมวลรวมหยาบเพราะมวลรวมหยาบต้องสามารถทนทานต่อแรงกระแทกและเสียดสีได้โดยใช้เครื่องลอสแอนเจลิส
- 2) เครื่องมือและวัสดุทดสอบ



รูปที่ 3-23 เครื่องลอสแอนเจลิส (Los Angeles Machine)



รูปที่ 3-24 ลูกเหล็ก (Abrasive Charge)



รูปที่ 3-25 เครื่องชั่งสามารถชั่งได้ละเอียด 0.1 กรัม



รูปที่ 3-26 ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 12



รูปที่ 3-27 หินประมาณ 5000 กรัม

3) วิธีการทดลอง

- ทำการเก็บตัวอย่างมวลรวมโดยวิธีการแบ่งสี่แล้วนำมาล้างให้สะอาดอบให้แห้งที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่

- นำมารอนผ่านตะแกรงมาตรฐานเพื่อเลือกเกรดที่ใกล้เคียงกับขนาดผลของมวลรวมมากที่สุด ชั่งน้ำหนักตามที่ค้างบนตะแกรงขนาดต่างๆ ตามจำนวนเกรดที่เลือกในคู่มือการทดสอบ

- นำมวลรวมที่ชั่งไว้ตามจำนวนมาผสมกันอีกครั้งหนึ่ง เพื่อใช้เป็นตัวอย่างทดสอบต่อไป

- นำมวลรวมที่จะทดสอบและลูกเหล็กตามจำนวนที่เลือกไว้ตามตารางลงในเครื่องลอสแอนเจลิส (Los Angeles Machine) ซึ่งหมุนด้วยความเร็ว 30-33 รอบต่อวินาทีสำหรับมวลรวมเกรด A, B, C และ D ตั้งเครื่องให้หมุน 500 รอบ และมวลรวมเกรด E, F, G ตั้งเครื่องให้หมุน 1000 รอบ

- เมื่อเครื่องหมุนได้ตามจำนวนรอบแล้วให้เอามวลรวมทั้งหมดออกจากเครื่องแยกคร่าวๆ ด้วยตะแกรงที่ใหญ่กว่าเบอร์ 12 แล้วนำส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ดังกล่าวมารอนผ่านตะแกรงเบอร์ 12 อีกครั้ง

- นำส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 12 ทั้งหมดมาล้างให้สะอาดนำไปอบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเป็นน้ำหนักหลังการทดลอง

4) วิธีการคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การสึกกร่อน (Percent of Wear)} = \frac{(A - B) \times 100\%}{A}$$

A น้ำหนักของมวลรวมหยาบที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด

B น้ำหนักของมวลรวมหยาบที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 12 หลังจากการล้างและอบแห้งแล้วเปอร์เซ็นต์การสึกกร่อนของมวลรวมหยาบต้องมีค่าไม่เกิน 40 เปอร์เซ็นต์ สำหรับงานถนน การขุดสี (เช่นงานถนน) และ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบสำหรับงานก่อสร้างทั่วไป



### 3.7 การขึ้นรูปของวัสดุผสมสำหรับคอนกรีตกำลังสูง

1. ทำการชั่งปูนซีเมนต์ ทราย หิน แก้วปาล์ม น้ำมัน และแก้วชานอ้อย ตามอัตราส่วนผสมที่กำหนด



รูปที่ 3-28 ส่วนผสมที่ทำกรซั้งแล้ว

2. นำทราย ปูนซีเมนต์ แก้วปาล์ม น้ำมัน และแก้วชานอ้อยใส่ลงในที่ผสมของคอนกรีตกำลังสูง และผสมให้เข้ากันอย่างทั่วถึงด้วย



รูปที่ 3-29 แสดงการผสมส่วนผสม

3. ใส่ น้ำสะอาดและสาร ลดน้ำพิเศษ ตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ลงในที่ผสมของคอนกรีตกำลังสูง



รูปที่ 3-30 ใส่ น้ำและสารลดน้ำลงไปในส่วนผสม

4. นำหินตามอัตราส่วนที่กำหนดใส่ลงในเครื่องผสมของคอนกรีตกำลังสูง และผสมให้เข้ากันอย่างทั่วถึง



รูปที่ 3-31 แสดงการผสมหินให้เข้ากับส่วนผสม

5. ทำการผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันประมาณ 2-3 นาที แล้วจึงนำเทลงในภาชนะที่เตรียมไว้เพื่อทำการลำเลียงส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงเข้าแบบหล่อ



รูปที่ 3-32 แสดงการนำส่วนผสมเสร็จใส่แบบหล่อ

6. นำส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเสร็จแล้วไปเทลงในแบบหล่อของคอนกรีตกำลังสูงที่ได้เตรียมไว้ (คอนกรีตเมื่อผสมเสร็จแล้วต้องใช้ภายใน 30 นาที)

7. ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อให้คอนกรีตกำลังสูงจับตัวเป็นก้อนแล้วจึงทำการถอดแบบหล่อออกโดยจะต้องทำเครื่องหมายที่คอนกรีตไว้ทุกก้อนโดยใช้สูตรอัตราส่วนผสมเรียงกันแล้วนำก้อนคอนกรีตกำลังสูงที่ได้นำไปบ่มไว้ตามระยะเวลาที่กำหนด คือ 90, 120, 150 นาที ซึ่งในการบ่มคอนกรีตกำลังสูงจะบ่มโดยใช้วิธีอบด้วยเตาเอาไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างกัน คือ 450, 720, 900 Watts



รูปที่ 3-33 แสดงส่วนผสมเสร็จแล้วเข้าแบบหล่อ

### 3.8 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูง

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตกำลังสูงเพื่อตรวจสอบหาความหนาแน่น ค่าการดูดซึมน้ำและกำลังต้านทานแรงอัดซึ่งในการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ จะใช้ตัวอย่างที่มีขนาด (กว้าง x ยาว x สูง) 15x15x15 เซนติเมตร

#### 3.8.1 วิธีการทดสอบหาความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำ (Absorption Test)

1. คัดเลือกคอนกรีตกำลังสูงจากแหล่งเดียวกับการทำการทดสอบกำลังแรงอัด โดยคัดเลือกคอนกรีตกำลังสูงจำนวน 3 ก้อน
2. ชั่งน้ำหนักขึ้นทดสอบแต่ละก้อน ซึ่งถือว่าเป็นน้ำหนักคอนกรีตกำลังสูงแห้ง (Dry Weight) ทำการบันทึกค่า



รูปที่ 3-34 แสดงการชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบ

3. แช่ขึ้นทดสอบในน้ำสะอาดให้ผิวน้ำท่วมขึ้นทดสอบจนมิดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้คอนกรีตกำลังสูงอิ่มตัว



รูปที่ 3-35 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

4. หลังจากแช่งน้ำขึ้นทดสอบครบ 24 ชั่วโมง แล้วนำขึ้นทดสอบขึ้นจากน้ำแล้วเช็ดให้ผิวของขึ้นทดสอบปราศจากน้ำ

5. ชั่งน้ำหนักขึ้นทดสอบจากข้อ 4 ซึ่งถือว่าเป็นน้ำหนักคอนกรีตกำลังสูง, เปียก (Wet Weight) ทำการบันทึกค่า โดยการชั่งนี้ต้องกระทำในเวลา 5 นาที หลังจากนำขึ้นจากน้ำ ทั้งนี้เพื่อมิให้เกิดการสูญเสียความชื้นแก่อากาศแล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณ

### 3.8.2 วิธีการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด (Compression Test)

1. นำตัวอย่างอิฐคอนกรีตกำลังสูงจำนวน 5 ก้อน โดยทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตทั้ง 5 ก้อนแล้วนำ 2 ก้อนที่มีค่าน้อยสุดกับมากที่สุดออกโดยนำ 3 ก้อนที่เหลือมาหาค่าเฉลี่ยของกำลังอัดทั้งหมดทั้งหมดเป็นเกณฑ์

2. นำคอนกรีตกำลังสูงวางบนที่รองรับเริ่มให้น้ำหนักกดในอัตราสม่ำเสมอโดยกำหนดให้ไม่เกิน 1,000 กิโลกรัมต่อนาที หรืออัตราหวักดไม่เกิน 0.05 นิ้วต่อนาที จนกระทั่งขึ้นทดสอบวิบัติอ่านค่ากำลังที่ทำให้ขึ้นทดสอบวิบัติ บันทึกค่าเพื่อนำไปทำการคำนวณ



รูปที่ 3-36 การทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด

### 3.9 การวิเคราะห์

1.) วิเคราะห์หาความหนาแน่น และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ โดยใช้สมการ

$$\rho = \frac{M}{V}$$

โดยที่  $\rho$  ความหนาแน่นของวัสดุมีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

M, W1 มวล (Mass) หรือน้ำหนักที่แห้ง มีหน่วยเป็นกรัม (g)

V ปริมาตร (Volume) มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{cm}^3$ )

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100\%$$

เมื่อ เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ แทน ค่าร้อยละของการดูดซึมน้ำ (% Absorption)

$W_1$  น้ำหนักอิฐที่แห้ง กรัม (g)

$W_2$  น้ำหนักอิฐที่ดูดซึมน้ำ กรัม (g)

2) วิเคราะห์ข้อมูลคุณลักษณะที่ต้องการด้านลักษณะทั่วไปและความต้านทานแรงอัดใช้สถิติในการหาความต้านทานแรงอัดเฉลี่ย โดยใช้สูตร

$$F = \frac{P}{A}$$

เมื่อ F ความต้านทานแรงอัด, กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

P แรงอัดที่ทำให้ชิ้นทดสอบวิบัติ, กิโลกรัมนิวตัน

A พื้นที่รับแรงอัด, ตารางเซนติเมตร

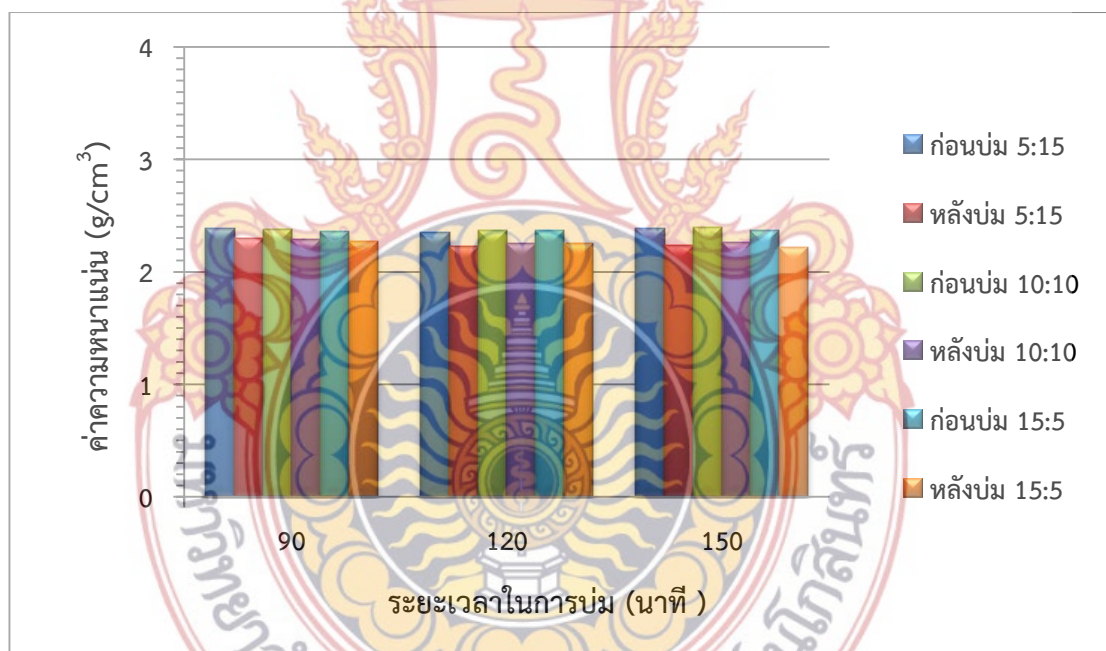


## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการที่ได้ทำการทดสอบคอนกรีตกำลังสูงที่มีส่วนผสมของวัสดุชีวมวลครั้งนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตกำลังสูงจากการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตซึ่งได้ทำการออกแบบโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ทราหยาบโดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และ 100 ใช้หินขนาด 3/4 นิ้วและใช้เถ้าปาล์มน้ำมันกับเถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานซึ่งกำหนด Water Cement Ratio เท่ากับ 0.35 แล้วนำก้อนคอนกรีตที่ได้มาบ่มที่ระยะเวลา 90, 120 และ 150 นาที ที่กำลังไมโครเวฟ 450, 720 และ 900 Watts เพื่อนำไปทดสอบหาค่าคุณสมบัติต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับบ่มในน้ำที่อายุ 28 วันซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

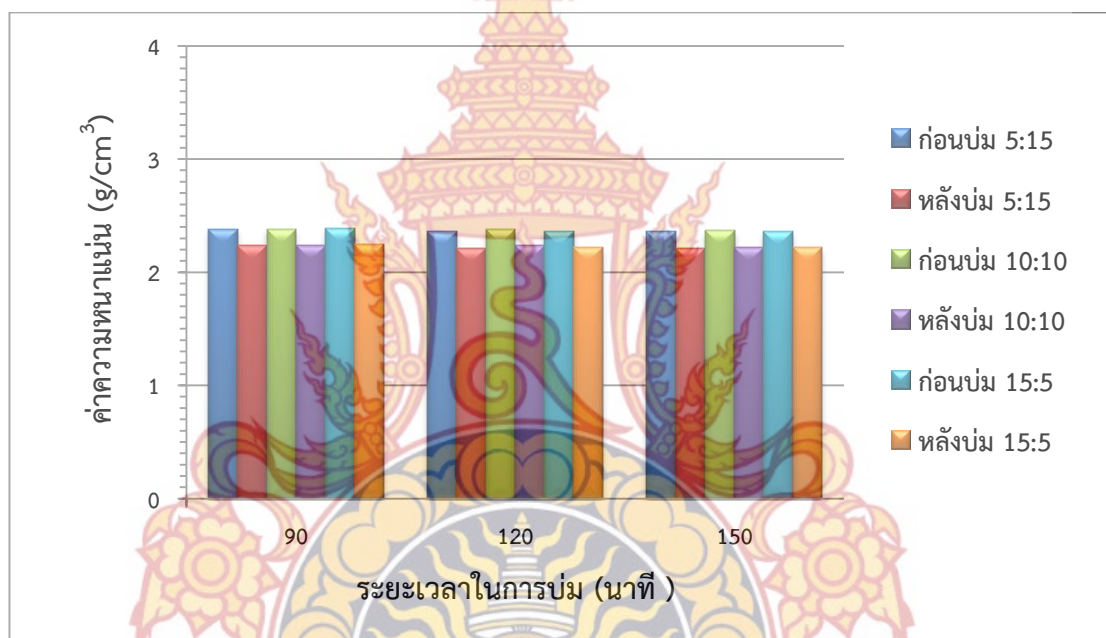
4.1 ผลการทดสอบการหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง ซึ่งคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมวัสดุชีวมวลในอัตราส่วนต่างกันจะมีน้ำหนักที่ต่างกัน



รูปที่ 4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของอัตราส่วนผสมต่างๆ กับระยะเวลาในการบ่ม ที่กำลังไมโครเวฟ 450 Watts

จากกราฟเป็นกราฟการหาค่าความหนาแน่นก่อนบ่มและหลังบ่มของอัตราส่วนผสม 5:15, 10:10 และ 15:5 ที่ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 90, 120 และ 150 นาทีโดยใช้กำลังไมโครเวฟในการบ่ม 450 Watts ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าของความหนาแน่นก่อนบ่มและหลังบ่มของทั้งสามอัตราส่วนผสมนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ใช้ระยะเวลาในการบ่มเริ่มต้นที่ 90 นาที อัตราส่วนผสม 5:15 ค่าของ

ความหนาแน่นทั้งก่อนบ่มและหลังบ่มนั้นมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.39 และ 2.30  $\text{g/cm}^3$  ซึ่งอัตราส่วนผสม 15:5 มีค่าของความหนาแน่นทั้งก่อนบ่มและหลังบ่มน้อยที่สุดเท่ากับ 2.36 และ 2.27  $\text{g/cm}^3$  เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นไปที่ 120 นาที อัตราส่วนผสมของ 10:10 และ 15:5 ค่าของความหนาแน่นทั้งก่อนบ่มและหลังบ่มจะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 2.37 และ 2.25  $\text{g/cm}^3$  แต่เมื่อเวลาผ่านไป 150 นาที อัตราส่วนผสมของ 10:10 ทั้งก่อนบ่มและหลังบ่มมีค่าความหนาแน่นมากที่สุดเท่ากับ 2.40 และ 2.26  $\text{g/cm}^3$  ส่วนอัตราส่วนผสม 15:5 จะมีค่าความหนาแน่นของก่อนบ่มและหลังบ่มน้อยที่สุดเท่ากับ 2.37 และ 2.22  $\text{g/cm}^3$  โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าของความหนาแน่นทั้งสามอัตราส่วนนั้นมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งก็เกิดมาจากน้ำหนักของก้อนตัวอย่างทดสอบทั้งก่อนบ่มและหลังบ่มนั้นมีค่าใกล้เคียงกันถ้าสัดส่วนผสมใดมีค่าน้ำหนักของก้อนตัวอย่างทดสอบที่สูงกว่าก็จะทำให้ค่าของความหนาแน่นสูงขึ้นตามไปด้วย

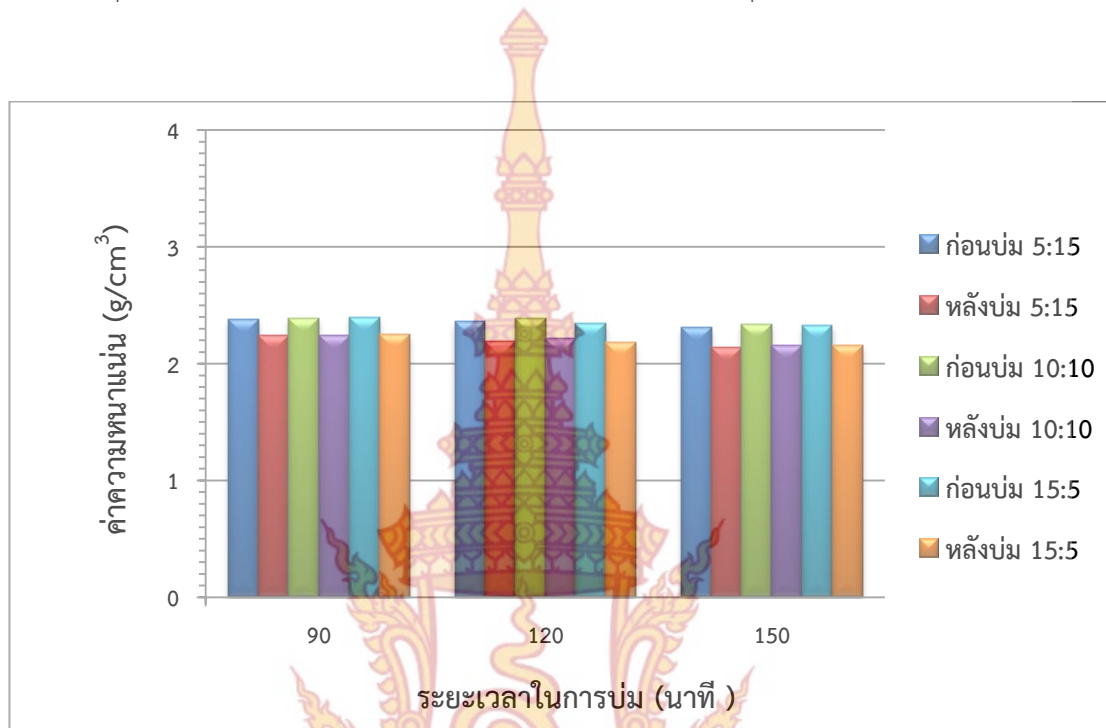


รูปที่ 4-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของอัตราส่วนผสมต่างๆ กับระยะเวลาในการบ่มที่กำลังไมโครเวฟ 720 Watts

จากกราฟเป็นกราฟการหาค่าความหนาแน่นก่อนบ่มและหลังบ่มของอัตราส่วนผสม 5:15, 10:10, และ 15:5 ที่ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 90, 120 และ 150 นาทีโดยใช้กำลังไมโครเวฟในการบ่ม 720 Watts ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าของความหนาแน่นก่อนบ่มและหลังบ่มของทั้งสามอัตราส่วนผสมนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ใช้ระยะเวลาในการบ่มเริ่มต้นที่ 90 นาที อัตราส่วนผสม 15:5 ค่าของความหนาแน่นทั้งก่อนบ่มและหลังบ่มนั้นมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.39 และ 2.25  $\text{g/cm}^3$  เมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที อัตราส่วนผสม 10:10 มีค่าของความหนาแน่นก่อนบ่มและหลังบ่มสูงสุดเท่ากับ 2.38 และ 2.24  $\text{g/cm}^3$  เมื่อเวลาผ่านไป 150 นาที อัตราส่วนผสม 10:10 ก็ยังมีค่าของความหนาแน่นก่อนบ่มและหลังบ่มสูงสุดเท่ากับ 2.37 และ 2.22  $\text{g/cm}^3$  โดยที่อัตราส่วน 5:15 กับ 15:5 มีค่าของความหนา



แน่นก่อนบ่มและหลังบ่มเท่ากันคือ 2.36 และ 2.22  $\text{g/cm}^3$  โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นทั้งก่อนบ่มและหลังบ่มของอัตราส่วนผสม 10:10 มีค่ามากกว่าอัตราส่วนผสม 5:15 และ 15:5 ทั้งสองระยะเวลาในการบ่มซึ่งเกิดขึ้นจากน้ำหนักของก้อนตัวอย่างทดสอบในอัตราส่วน 10:10 นั้นมีค่ามากที่สุดทั้งก่อนและหลังการบ่มจึงทำให้ค่าความหนาแน่นมากที่สุด

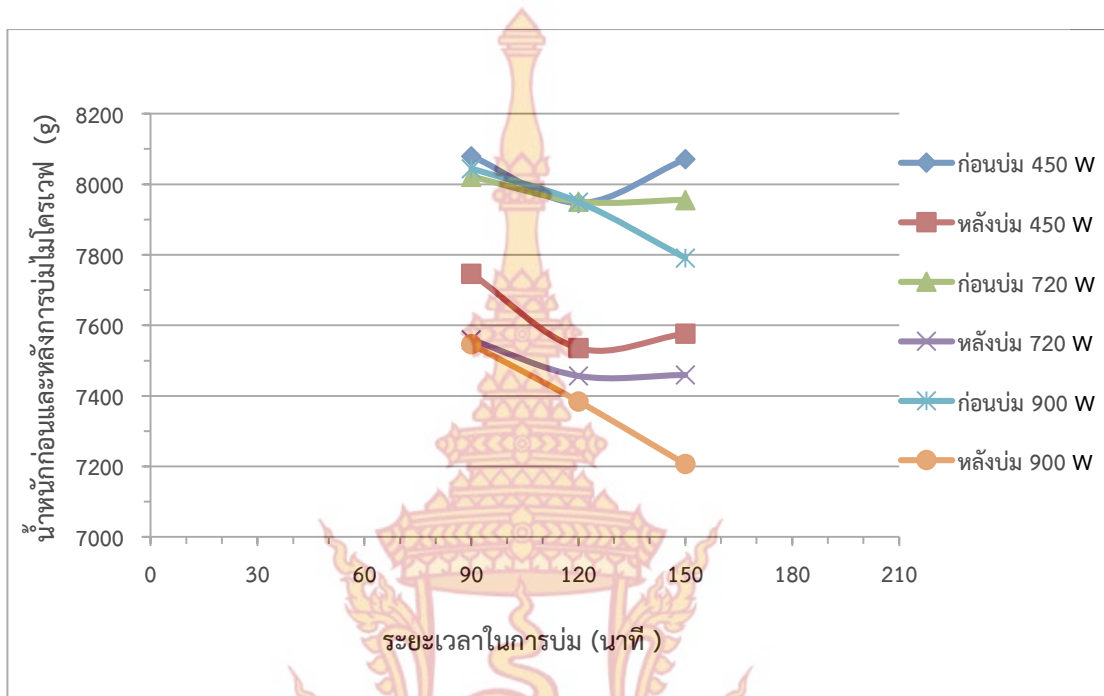


รูปที่ 4-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของอัตราส่วนผสมต่างๆ กับระยะเวลาในการบ่มที่กําลังไมโครเวฟ 900 Watts

จากกราฟเป็นกราฟการหาค่าความหนาแน่นก่อนบ่มและหลังบ่มของอัตราส่วนผสม 5:15, 10:10, และ 15:5 ที่ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 90, 120 และ 150 นาทีโดยใช้กําลังไมโครเวฟในการบ่ม 900 Watts ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าของความหนาแน่นก่อนบ่มและหลังบ่มของทั้งสามอัตราส่วนผสมนั้นมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งเมื่อเริ่มการบ่มที่ 90 นาที ค่าความหนาแน่นของอัตราส่วนผสม 15:5 ทั้งก่อนบ่มและหลังบ่มจะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 2.4 และ 2.25  $\text{g/cm}^3$  โดยที่อัตราส่วนผสม 5:15 จะมีค่าของความหนาแน่นน้อยสุดเท่ากับ 2.38 และ 2.24  $\text{g/cm}^3$  เมื่อเวลาผ่านไป 120 นาทีค่าความหนาแน่นของอัตราส่วนผสม 15:5 ทั้งก่อนบ่มและหลังบ่มจะมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 2.35 และ 2.18  $\text{g/cm}^3$  แต่กลับกันค่าความหนาแน่นของอัตราส่วนผสม 10:10 ทั้งก่อนบ่มและหลังบ่มมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 2.39 และ 2.22  $\text{g/cm}^3$  ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไป 150 นาทีก็เช่นกันอัตราส่วนผสมของ 10:10 ก็ยังมีค่าความหนาแน่นทั้งก่อนบ่มและหลังบ่มมากที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 2.34 และ 2.16 รองลงมาคืออัตราส่วนผสมของ 15:5 ซึ่งค่าความหนาแน่นทั้งก่อนบ่มและหลังบ่มเท่ากับ 2.33 และ 2.16  $\text{g/cm}^3$  ส่วนอัตราส่วนผสม 5:15 มีค่าความหนาแน่นทั้งก่อนบ่มและหลังบ่มน้อยสุดเท่ากับ 2.31 และ 2.14  $\text{g/cm}^3$  โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นของอัตราส่วนผสมที่มีค่ามากที่สุดกับอัตราส่วนผสมที่มีค่าน้อยที่สุดนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกันมากซึ่งส่งผลมาจากน้ำหนักของก้อนตัวอย่างทดสอบทั้งก่อนบ่มและหลังบ่มนั้นมีค่า

ใกล้เคียงกันจึงทำให้ค่าของความหนาแน่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกันโดยที่อัตราส่วนใดมีน้ำหนักของก้อนตัวอย่างมากกว่าก็ทำให้ค่าของความหนาแน่นมากขึ้นเหมือนกัน

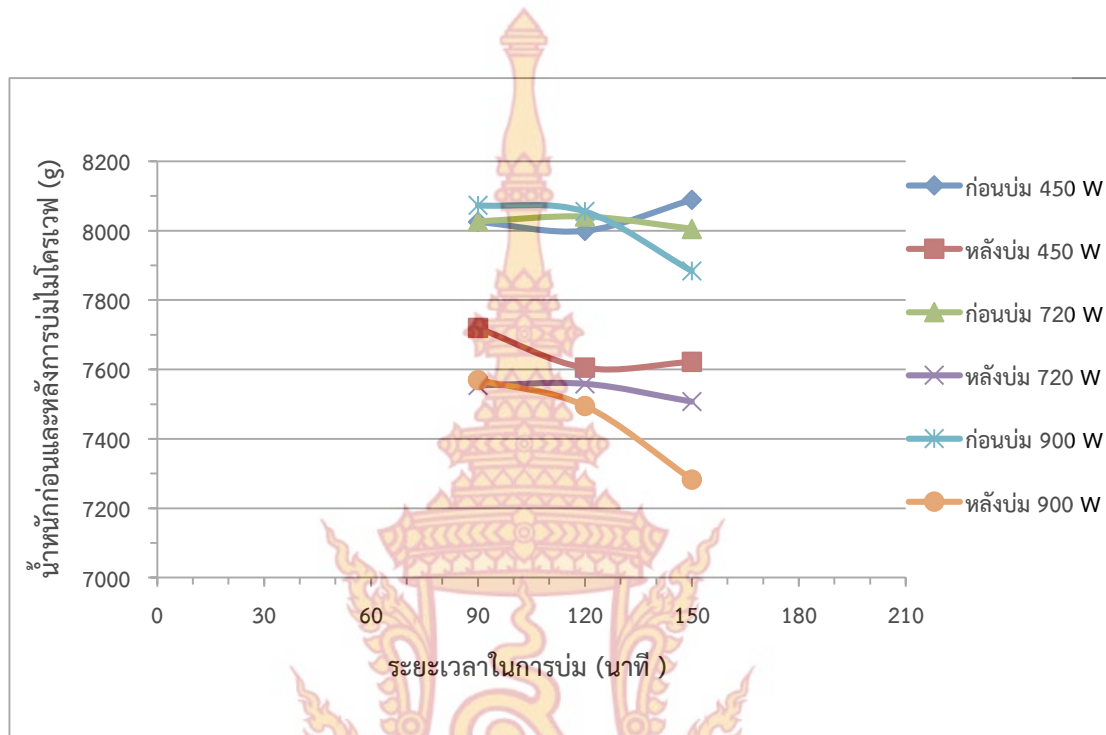
#### 4.2 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักก่อนและหลังบ่มของก้อนตัวอย่างด้วยไมโครเวฟโดยเฉลี่ย



รูปที่ 4-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของก้อนตัวอย่างก่อนและหลังการบ่มด้วยไมโครเวฟเทียบกับระยะเวลาต่างๆ ในการบ่มของอัตราส่วนผสม 5:15

จากกราฟแสดงน้ำหนักก่อนบ่มและหลังบ่มที่กำลังไมโครเวฟ 450 Watts, 720 Watts และ 900 Watts โดยใช้ระยะเวลาในการบ่ม 90, 120 และ 150 นาที ของอัตราส่วนผสม 5:15 ซึ่งจะเห็นได้ว่าน้ำหนักก่อนบ่มของทั้งสามกำลังไมโครเวฟนั้นมีค่าไม่ต่างกันมากนักแต่น้ำหนักของก้อนตัวอย่างทดสอบที่ระยะเวลาในการบ่ม 150 นาทีค่าน้ำหนักก่อนบ่มที่ 450 Watts จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 8071g และที่กำลังไมโครเวฟที่ 900 Watts จะมีค่าน้อยสุดเท่ากับ 7791 g แต่เมื่อนำก้อนตัวอย่างทดสอบไปบ่มที่ระยะเวลาต่างๆ แล้วพบว่าลักษณะของเส้นกราฟจะแตกต่างกันเมื่อใช้เวลาเริ่มต้นที่ 90 นาที น้ำหนักของก้อนตัวอย่างหลังการบ่มของกำลังไมโครเวฟที่ 450 Watts จะมีค่าน้ำหนักที่ลดลงน้อยที่สุดโดยน้ำหนักที่ระเหยไปหลังการบ่มเท่ากับ 333.33 g คิดเป็น 4.12% ขณะที่กำลังไมโครเวฟที่ 900 Watts จะมีค่าน้ำหนักที่ลดลงที่มากที่สุดโดยน้ำหนักที่ระเหยไปหลังการบ่มมีค่าเท่ากับ 498 g คิดเป็น 6.19% เมื่อเวลาผ่านไป 120 นาทีน้ำหนักของก้อนตัวอย่างหลังการบ่มของกำลังไมโครเวฟที่ 900 Watts จะมีค่าน้ำหนักที่ลดลงมากที่สุดโดยน้ำหนักที่ระเหยไปหลังการบ่มเท่ากับ 565 g กรัม คิดเป็น 7.11% ขณะที่กำลังไมโครเวฟที่ 450 W จะมีค่าน้ำหนักที่ลดลงที่น้อยที่สุดโดยน้ำหนักที่ระเหยไปหลังการบ่มมีค่าเท่ากับ 411.66 g คิดเป็น 5.18% และเมื่อเวลาผ่านไป 150 นาที ค่าของน้ำหนักที่ลดลงของกำลังไมโครเวฟที่ลดมากที่สุดกับลดน้อยสุดก็มีความแตกต่างกันอยู่ที่ 89 g โดยคิดเป็น

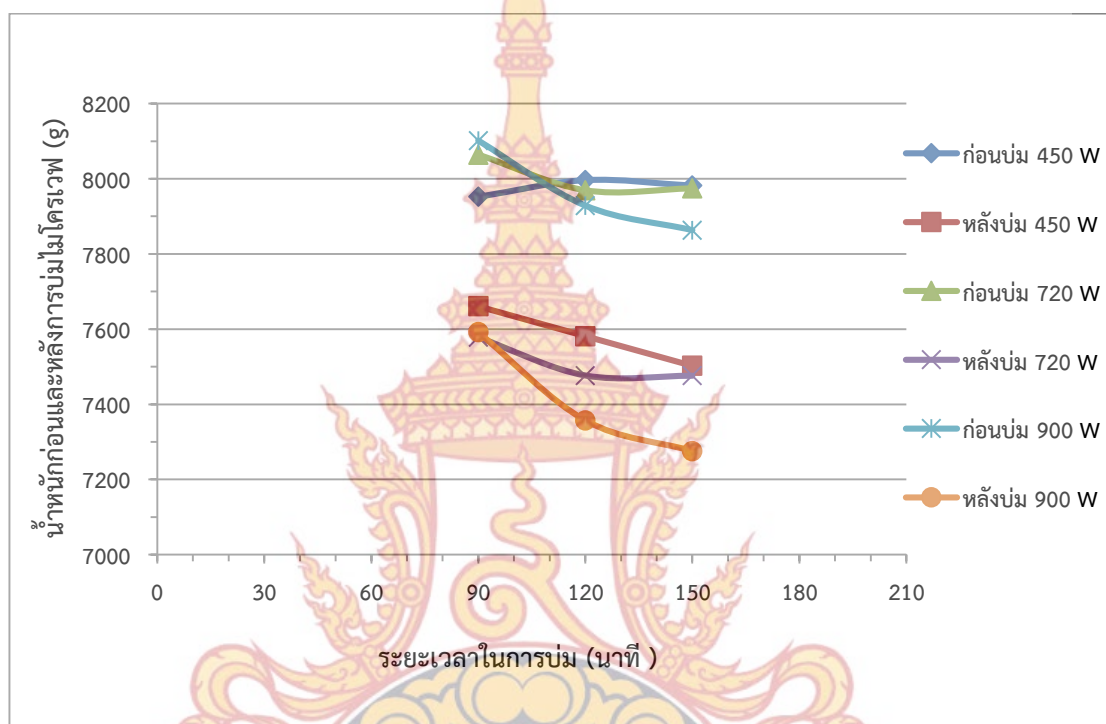
ปริมาณความชื้นที่ระเหยหลังการบ่มได้เท่ากับ 1.37% ซึ่งแสดงได้ว่าเมื่อใช้เวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น กำลังไมโครเวฟที่สูงขึ้นจะทำให้น้ำหนักของก้อนตัวอย่างทดสอบลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการทำงานของคลื่นไมโครเวฟที่ทำให้เกิดความร้อนภายในความชื้นในก้อนตัวอย่างกลายเป็นพลังงานความร้อน และเกิดการระเหยออกมาอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของก้อนตัวอย่างก่อนและหลังการบ่มด้วยไมโครเวฟเทียบกับระยะเวลาต่างๆ ในการบ่มของอัตราส่วนผสม 10:10

จากกราฟแสดงน้ำหนักก่อนบ่มและหลังบ่มที่กำลังไมโครเวฟ 450 Watts, 720 Watts และ 900 Watts โดยใช้ระยะเวลาในการบ่ม 90, 120 และ 150 นาที ของอัตราส่วนผสม 10:10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าน้ำหนักก่อนบ่มของทั้งสามกำลังไมโครเวฟนั้นมีค่าไม่ต่างกันมากนักแต่จะแตกต่างกันที่น้ำหนักของก้อนตัวอย่างทดสอบที่ระยะเวลาในการบ่ม 150 นาที โดยที่ค่าน้ำหนักก่อนบ่มที่ 450 Watts จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 8089 g และที่กำลังไมโครเวฟที่ 900 Watts จะมีค่าน้อยสุดเท่ากับ 7884 g แต่เมื่อนำก้อนตัวอย่างทดสอบไปบ่มที่ระยะเวลาต่างๆ แล้วพบว่าลักษณะของเส้นกราฟจะแตกต่างกัน คือเมื่อใช้เวลาเริ่มต้นที่ 90 นาที น้ำหนักของก้อนตัวอย่างหลังการบ่มของกำลังไมโครเวฟที่ 450 Watts จะมีค่าน้ำหนักที่ลดลงน้อยที่สุดโดยน้ำหนักที่ระเหยไปหลังการบ่มเท่ากับ 305.67 g คิดเป็น 3.81% ขณะที่กำลังไมโครเวฟที่ 900 Watts จะมีค่าน้ำหนักที่ลดลงที่มากที่สุดโดยน้ำหนักที่ระเหยไปหลังการบ่มมีค่าเท่ากับ 503.33 g คิดเป็น 6.23% เมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที น้ำหนักของก้อนตัวอย่างหลังการบ่มของกำลังไมโครเวฟที่ 900 Watts จะมีค่าน้ำหนักที่ลดลงมากที่สุดโดยน้ำหนักที่ระเหยไปหลังการบ่มเท่ากับ 560.67g คิดเป็น 6.96% ขณะที่กำลังไมโครเวฟที่ 450 Watts จะมีค่าน้ำหนักที่ลดลงที่น้อยที่สุดโดยน้ำหนักที่ระเหยไปหลังการบ่มมีค่าเท่ากับ 394.67 g คิดเป็น

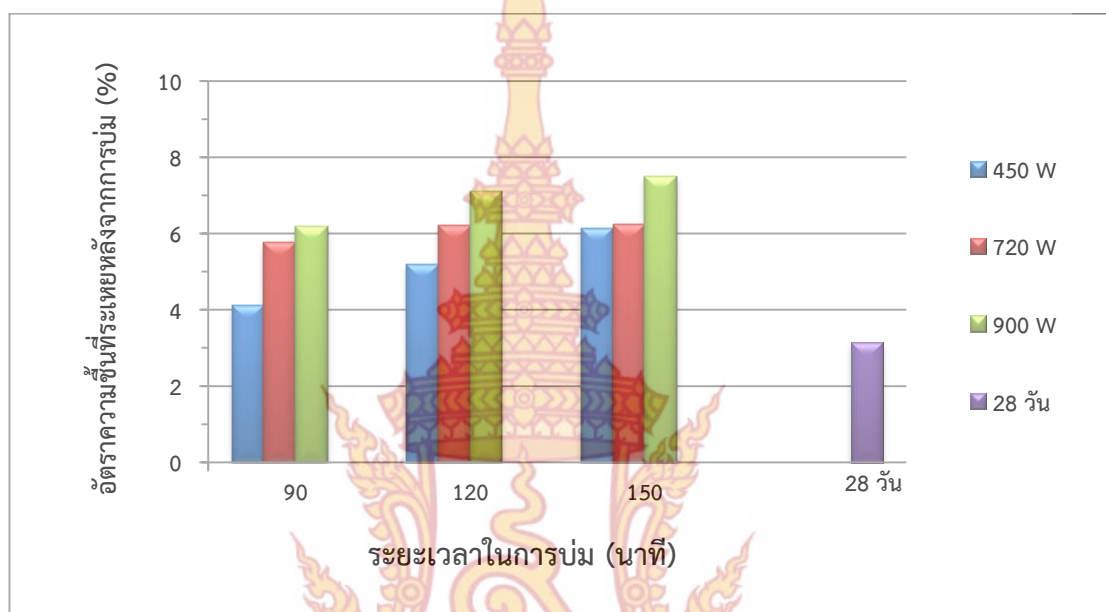
4.93% และเมื่อเวลาผ่านไป 150 นาที ค่าของน้ำหนักที่ลดลงของกำลังไมโครเวฟที่ลดมากที่สุดกับลดน้อยสุดก็มีความแตกต่างกันอยู่ที่ 134.33 g โดยคิดเป็นปริมาณความชื้นที่ระเหยหลังการบ่มได้เท่ากับ 1.85% ซึ่งแสดงได้ว่าเมื่อใช้เวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นกำลังไมโครเวฟที่ 450 Watts และ 720 Watts น้ำหนักของก้อนตัวอย่างจะค่อยๆ ลดลงแต่น้ำหนักของก้อนตัวอย่างที่กำลังไมโครเวฟ 900 Watts จะลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งเกิดขึ้นจากการทำงานของคลื่นไมโครเวฟที่ทำให้เกิดความร้อนภายในความชื้นในก้อนตัวอย่างกลายเป็นพลังงานความร้อนและเกิดการระเหยออกมาอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของก้อนตัวอย่างก่อนและหลังการบ่มด้วยไมโครเวฟเทียบกับระยะเวลาต่างๆ ในการบ่มของอัตราส่วนผสม 15:5

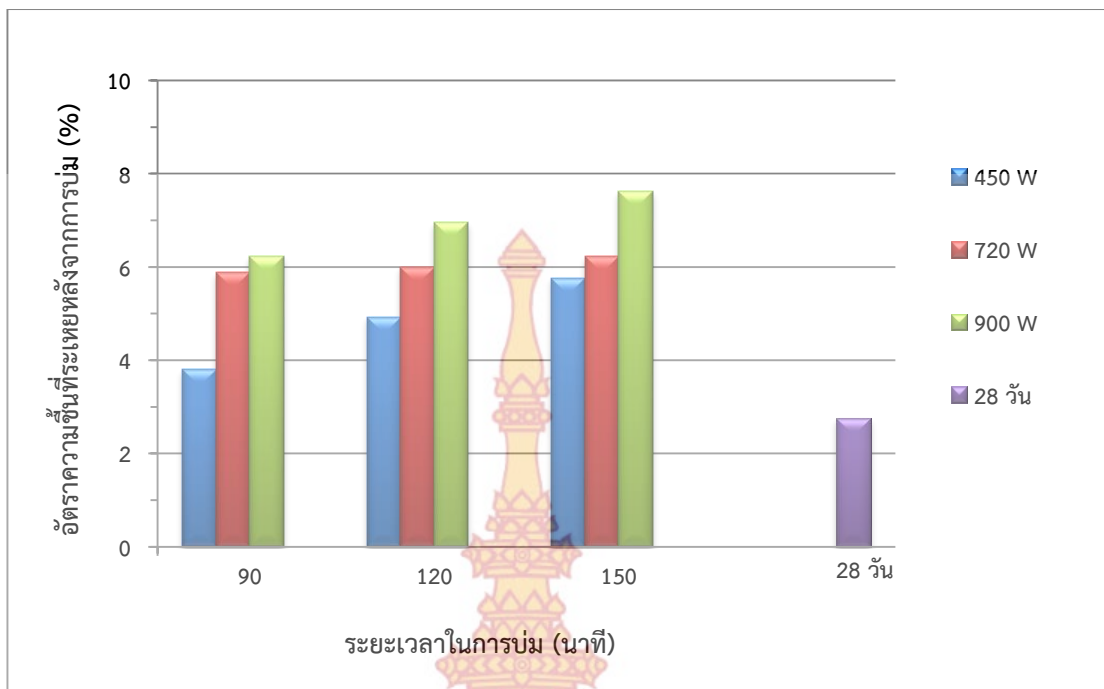
จากกราฟแสดงน้ำหนักก่อนบ่มและหลังบ่มที่กำลังไมโครเวฟ 450 Watts, 720 Watts และ 900 Watts โดยใช้ระยะเวลาในการบ่ม 90, 120 และ 150 นาที ของอัตราส่วนผสม 15:5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าน้ำหนักก่อนบ่มของทั้งสามกำลังไมโครเวฟนั้นมีค่าต่างกันแต่ก็ไม่มากนักแต่น้ำหนักก่อนบ่มที่ทดสอบไปบ่มที่ระยะเวลาต่างๆ แล้วพบว่าลักษณะของเส้นกราฟจะแตกต่างกันเมื่อใช้เวลาเริ่มต้นที่ 90 นาที น้ำหนักของก้อนตัวอย่างหลังการบ่มของกำลังไมโครเวฟที่ 450 Watts จะมีค่าน้ำหนักที่ลดลงน้อยที่สุดโดยน้ำหนักที่ระเหยไปหลังการบ่มเท่ากับ 291.33 g คิดเป็น 3.66% ขณะที่กำลังไมโครเวฟที่ 900 Watts จะมีค่าน้ำหนักที่ลดลงที่มากที่สุดโดยน้ำหนักที่ระเหยไปหลังการบ่มมีค่าเท่ากับ 510 g คิดเป็น 6.29% เมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที น้ำหนักของก้อนตัวอย่างหลังการบ่มของกำลังไมโครเวฟที่ 900 Watts จะมีค่าน้ำหนักที่ลดลงมากที่สุดโดยน้ำหนักที่ระเหยไปหลังการบ่มเท่ากับ 571.67 g คิดเป็น 7.21% ขณะที่กำลังไมโครเวฟที่ 450 Watts จะมีค่าน้ำหนักที่ลดลงที่น้อยที่สุดโดยน้ำหนักที่ระเหยไปหลังการบ่มมีค่าเท่ากับ 415.34 g คิดเป็น 5.19% และเมื่อเวลาผ่านไป

150 นาที ค่าของน้ำหนักที่ลดลงของกำลังไมโครเวฟที่ลดมากที่สุดกับลดน้อยสุดก็มีความแตกต่างกันอยู่ที่ 108.33 g โดยคิดเป็นปริมาณความชื้นที่ระเหยหลังการบ่มได้เท่ากับ 1.47% ซึ่งแสดงได้ว่าเมื่อใช้เวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้นกำลังไมโครเวฟที่สูงขึ้นจะทำให้น้ำหนักของก้อนตัวอย่างทดสอบลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งเกิดขึ้นจากการทำงานของคลื่นไมโครเวฟที่ทำให้เกิดความร้อนภายในความชื้นในก้อนตัวอย่างกลายเป็นพลังงานความร้อนและเกิดการระเหยออกมาอย่างรวดเร็วจะทำให้ก้อนตัวอย่างทดสอบที่กำลังไมโครเวฟที่ 900 Watts มีค่าน้ำหนักหลังการบ่มลดลงอย่างรวดเร็ว



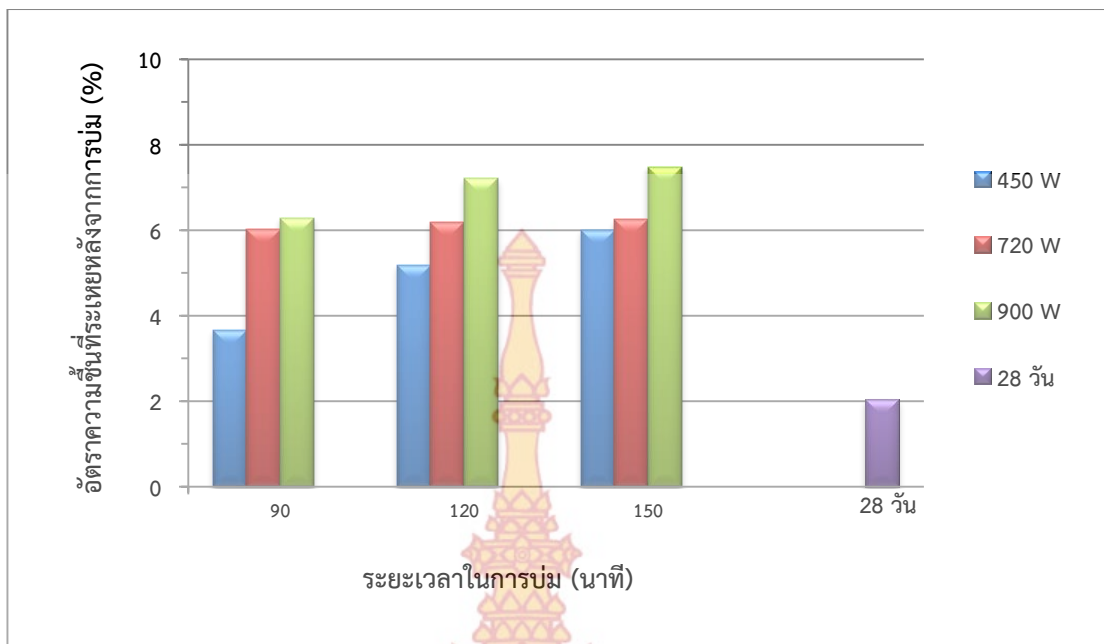
รูปที่ 4-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่ระเหยหลังการบ่มด้วยไมโครเวฟอัตราส่วนผสมเก๋าลำม 5% : เก๋าชานอ้อย 15% เทียบกับระยะเวลาของการบ่มที่ 28 วัน

จากกราฟแสดงอัตราความชื้นที่ระเหยหลังจากการบ่มของกำลังไมโครเวฟที่ 450 Watts, 720 Watts และ 900 Watts ที่ระยะเวลา 90, 120 และ 150 นาทีของอัตราส่วนผสม 5:15 โดยจะเห็นว่าอัตราความชื้นที่ระเหยออกหลังจากการบ่มด้วยไมโครเวฟจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาและกำลังวัตต์ที่มากขึ้นด้วยซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ 28 วันแล้วจะเห็นได้ว่าก้อนตัวอย่างทดสอบที่ทำการบ่มด้วยไมโครเวฟจะมีค่าสูงกว่าที่ทำการบ่มด้วย 28 วัน ในทุกๆ ระยะเวลาที่ใช้บ่มและทุกกำลังไมโครเวฟที่ใช้โดยเกิดขึ้นจากการทำงานของคลื่นไมโครเวฟทำให้ความชื้นในก้อนคอนกรีตซึ่งมีวัสดุเป็นส่วนผสม เกิดความร้อนภายในความชื้นในก้อนคอนกรีตกลายเป็นพลังงานความร้อนเกิดการระเหยออกมาอย่างรวดเร็วแต่ก้อนตัวอย่างทดสอบที่บ่ม 28 วัน จะเป็นการบ่มแบบธรรมชาติโดยที่ความร้อนจะค่อยๆระเหยออกมาจากก้อนตัวอย่างทดสอบอย่างช้าๆ



รูปที่ 4-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่ระเหยหลังการบ่มด้วยไมโครเวฟอัตราส่วนผสมเก๋กปาล์ม 10% :เล้าขานอ้อย 10% เทียบกับระยะเวลาของการบ่มที่ 28 วัน

จากกราฟแสดงอัตราความชื้นที่ระเหยหลังจากการบ่มของกำลังไมโครเวฟที่ 450 Watts, 720Watts และ 900 Watts ที่ระยะเวลา 90, 120 และ 150 นาที ของอัตราส่วนผสม 10:10 โดยจะเห็นว่าอัตราความชื้นที่ระเหยออกหลังจากการบ่มด้วยไมโครเวฟจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาและกำลังวัตต์ที่มากขึ้นด้วยซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ 28 วันแล้วจะเห็นได้ว่าก้อนตัวอย่างทดสอบที่ทำการบ่มด้วยไมโครเวฟจะมีค่าสูงกว่าที่ทำการบ่มด้วย 28 วัน ในทุกๆ ระยะเวลาที่ใช้บ่มและทุกกำลังไมโครเวฟที่ใช้โดยเกิดขึ้นจากการบ่มที่ 28 วัน จะเป็นการบ่มแบบธรรมชาติที่โดยที่ความร้อนจะค่อยๆ ระบายออกมาจากก้อนตัวอย่างทดสอบอย่างช้าๆ ที่น้ำจะเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิและรักษาความชื้นของก้อนตัวอย่างไม่ให้ระเหยออกไปมากเกินไปแต่การบ่มด้วยไมโครเวฟจะเป็นการทำงานของคลื่นไมโครเวฟทำให้ความชื้นในก้อนคอนกรีตซึ่งมีวัสดุเป็นส่วนผสมเกิดความร้อนภายในความชื้นในก้อนคอนกรีต กลายเป็นพลังงานความร้อนเกิดการระเหยออกมาอย่างรวดเร็ว

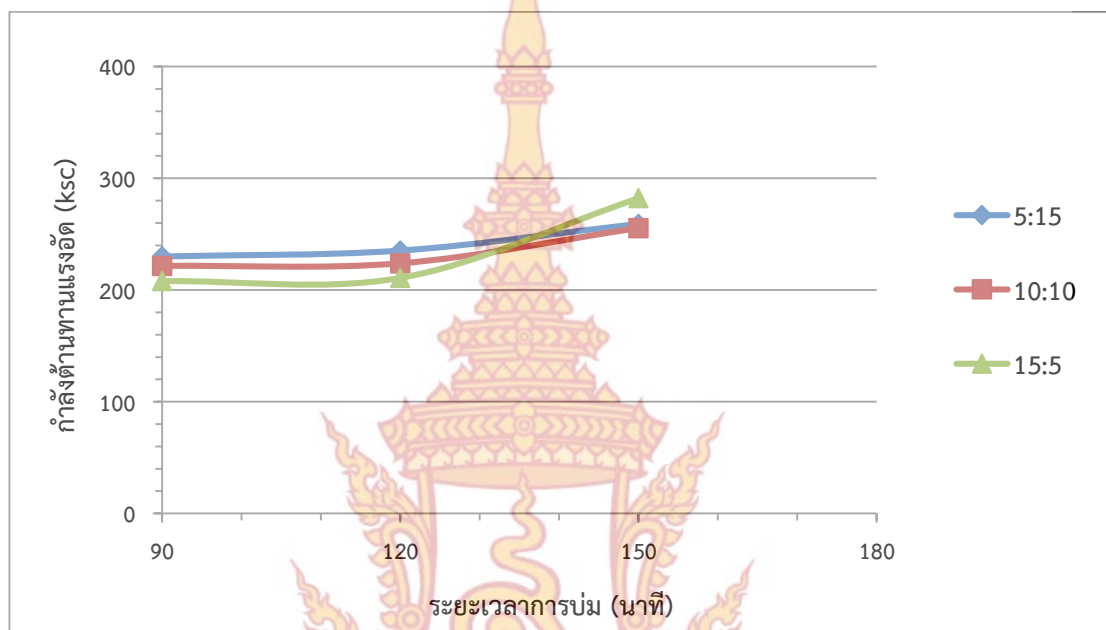


รูปที่ 4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่ระเหยหลังการบ่มด้วยไมโครเวฟอัตราส่วนผสมเถาปลาล์ม 15% :เถาขาน้อย 5% เทียบกับระยะเวลาของการบ่มที่ 28 วัน

จากกราฟแสดงอัตราความชื้นที่ระเหยหลังจากการบ่มของกำลังไมโครเวฟที่ 450 Watts, 720Watts และ 900 Watts ที่ระยะเวลา 90, 120 และ 150 นาที ของอัตราส่วนผสม 15:5 โดยจะเห็นว่าอัตราความชื้นที่ระเหยออกหลังจากการบ่มด้วยไมโครเวฟจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาและกำลังวัตต์ที่มากขึ้นด้วยซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ 28 วันแล้วจะเห็นว่าก้อนตัวอย่างทดสอบที่ทำการบ่มด้วยไมโครเวฟจะมีค่าสูงกว่าที่ทำการบ่มด้วย 28 วัน ในทุกๆ ระยะเวลาที่ใช้บ่มและทุกกำลังไมโครเวฟที่ใช้โดยเกิดขึ้นจากการทำงานของคลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนภายในความชื้นในก้อนตัวอย่างทดสอบกลายเป็นพลังงานความร้อนเกิดการระเหยออกมาอย่างรวดเร็วแต่การบ่มด้วยน้ำที่ 28 วันนั้นเป็นการบ่มโดยวิธีธรรมชาติซึ่งน้ำจะเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิและรักษาความชื้นของก้อนตัวอย่างทดสอบไว้ให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม

#### 4.3 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตกำลังสูงที่มีการบ่มด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลา/อัตราที่ต่างกัน

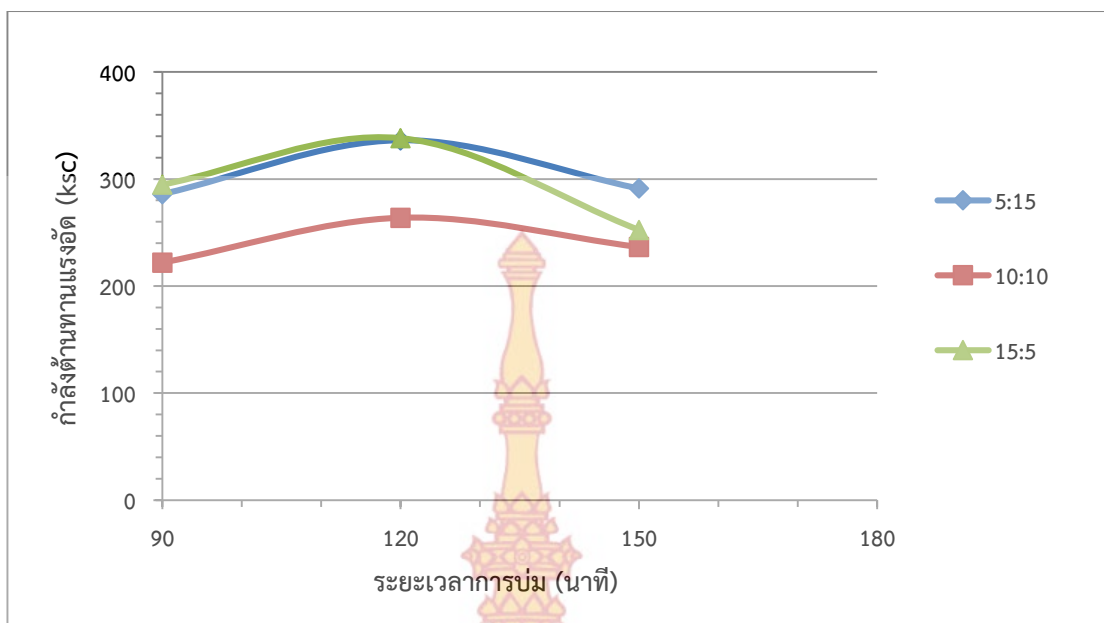
กำลังอัดของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติสำคัญของคอนกรีตแข็งตัวแล้วซึ่งหากมิได้มีการกำหนดไว้เป็นอย่างอื่นจะถือว่าผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันเป็นเกณฑ์การทดสอบทำการหล่อก่อนตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน



รูปที่ 4-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดและระยะเวลาของการบ่มด้วยไมโครเวฟที่ 450 Watts

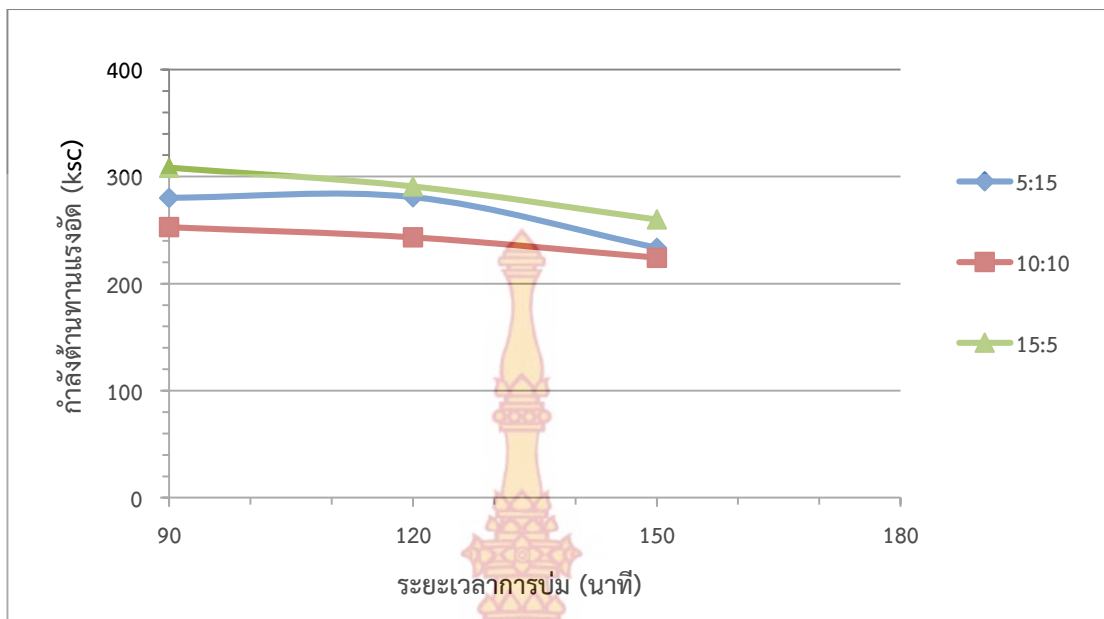
จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ระยะเวลาเริ่มต้นในการบ่มที่ 90 นาที อัตราส่วนผสมทั้งสามจะมีค่าใกล้เคียงกันโดยอัตราส่วนผสม 5:15 มีกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 230.11 ksc โดยที่อัตราส่วนผสม 15:5 มีกำลังต้านทานแรงอัดต่ำสุด เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 120 นาทีอัตราส่วนทั้งสามมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นโดยที่อัตราส่วนผสม 15:5 มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 210.97 ksc และอัตราส่วนผสม 5:15 มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 235.39 ksc และเมื่อเวลาผ่านไป 150 นาทีค่ากำลังต้านทานแรงอัดทั้งสามอัตราส่วนผสมมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วโดยที่อัตราส่วนผสม 10:10 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 255.37 ksc ซึ่งอัตราส่วนผสม 15:5 มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดมากที่สุดเท่ากับ 282.27 ksc จะเห็นได้ว่าที่กำลังไมโครเวฟที่ 450 Watts ยิ่งใช้ระยะเวลาในการบ่มนานขึ้นก็จะทำให้กำลังต้านทานแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการทำงานของคลื่นไมโครเวฟที่ทำให้เกิดความร้อนภายในความชื้นในก้อนตัวอย่างและเกิดการระเหยออกมาอย่างช้าๆ ซึ่งส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างเหมาะสมเช่นกันจึงทำให้ก้อนตัวอย่างทดสอบมีกำลังต้านทานรับแรงอัดได้สูงขึ้น





รูปที่ 4-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดและระยะเวลาของการปั๊มด้วยไมโครเวฟที่ 720 Watts

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ระยะเวลาเริ่มต้นในการปั๊มที่ 90 นาทีอัตราส่วนผสมทั้งสามจะมีค่าต่างกันโดยอัตราส่วนผสม 15:5 มีกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 294.73 ksc โดยที่อัตราส่วนผสม 10:10 มีกำลังต้านทานแรงอัดต่ำสุดเท่ากับ 221.91 เมื่อระยะเวลาในการปั๊มเพิ่มขึ้นเป็น 120 นาที อัตราส่วนทั้งสามมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นโดยที่อัตราส่วนผสม 10:10 มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 263.72 ksc และอัตราส่วนผสม 15:5 มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 338.1 ksc และเมื่อเวลาผ่านไป 150 นาทีค่ากำลังต้านทานแรงอัดทั้งสามอัตราส่วนผสมมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วโดยที่อัตราส่วนผสม 10:10 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 236.43 ksc ซึ่งอัตราส่วนผสม 5:15 มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดมากที่สุดเท่ากับ 291.1 ksc จะเห็นได้ว่าที่กำลังไมโครเวฟที่ 720 Watts ยิ่งใช้ระยะเวลาในการปั๊มนานขึ้น 150 นาที ก็จะทำให้กำลังต้านทานแรงอัดลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการทำงานของคลื่นไมโครเวฟที่ทำให้เกิดความร้อนภายในความชื้นในก้อนตัวอย่าง และเกิดการระเหยออกมาอย่างรวดเร็วซึ่งส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกันจึงทำให้ก้อนตัวอย่างทดสอบมีกำลังต้านทานรับแรงอัดได้น้อยลง

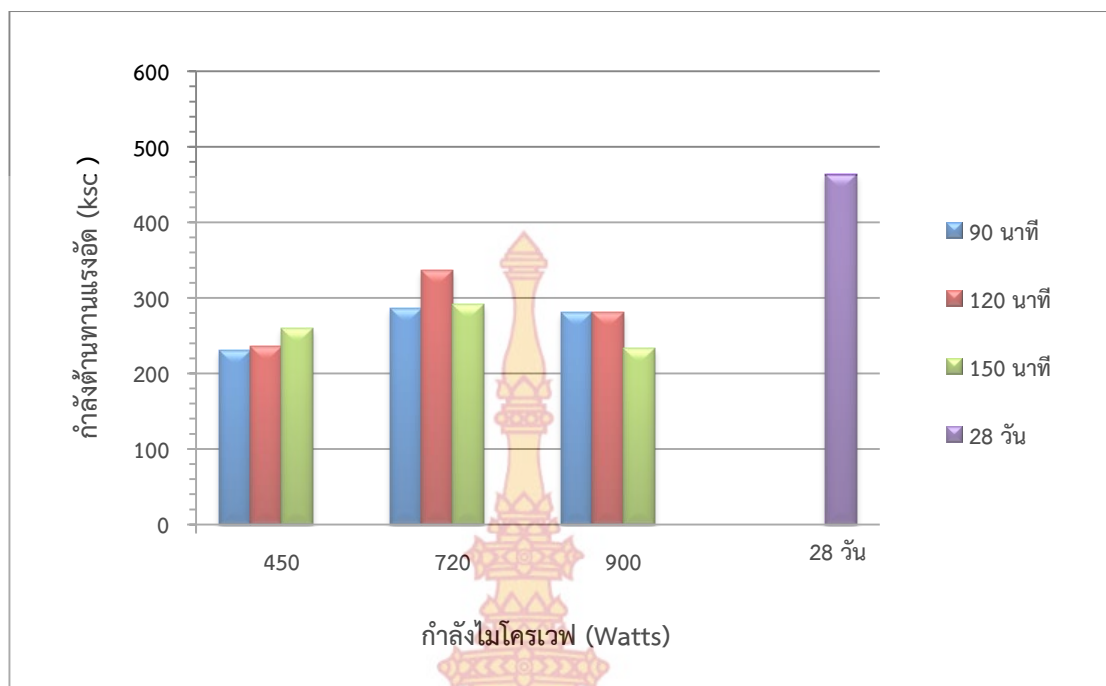


รูปที่ 4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดและระยะเวลาของการปัมด้วยไมโครเวฟที่ 900 Watts

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ระยะเวลาเริ่มต้นในการปัมที่ 90 นาทีค่าอัตราส่วนผสม 15:5 มีกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดโดยที่อัตราส่วนผสม 10:10 มีกำลังต้านทานแรงอัดต่ำสุดเมื่อระยะเวลาในการปัมเพิ่มขึ้นเป็น 120 นาที อัตราส่วนทั้งสามมีแนวโน้มลดลงโดยที่อัตราส่วนผสม 10:10 มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 243.29 ksc และอัตราส่วนผสม 15:5 มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 290.75 ksc และเมื่อเวลาผ่านไป 150 นาทีค่ากำลังต้านทานแรงอัดทั้งสามอัตราส่วนผสมก็ยังมีค่าลดลงเช่นกันโดยที่อัตราส่วนผสม 10:10 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 224.26 ksc ซึ่งอัตราส่วนผสม 15:5 มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดมากที่สุดเท่ากับ 259.98 ksc จะเห็นได้ว่าที่กำลังไมโครเวฟที่ 900 Watts ยิ่งใช้ระยะเวลาในการปัมนานขึ้นก็จะทำให้กำลังต้านทานแรงอัดลดลงไปเรื่อยๆ เนื่องจากการทำงานของคลื่นไมโครเวฟที่ทำให้เกิดความร้อนภายในความชื้นในก้อนตัวอย่างกลายเป็นพลังงานความร้อนและเกิดการระเหยออกอย่างรวดเร็วซึ่งส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกันจึงทำให้ลักษณะภายนอกบนผิวหน้าของก้อนตัวอย่างทดสอบมีรอยร้าวเนื่องจากปริมาณความชื้นของก้อนตัวอย่างทดสอบระเหยออกในปริมาณมากจึงส่งผลให้ก้อนตัวอย่างทดสอบมีกำลังต้านทานรับแรงอัดได้น้อยลง

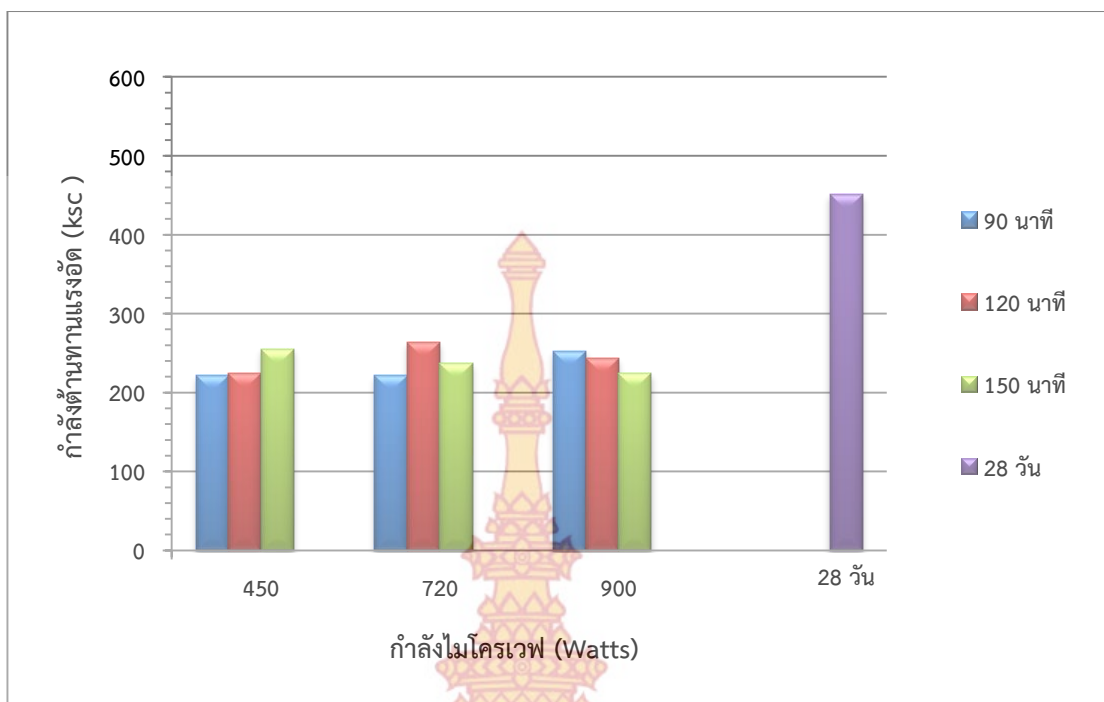
จากกราฟทั้ง 3 จะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่อัตราส่วนผสม 15:5 มีกำลังต้านทานแรงอัดมากกว่าอัตราส่วน 5:15 และ 10:10 ทั้งนี้เนื่องจากอัตราส่วน 15:5 คือ เถ้าปาล์มน้ำมัน 15% และเถ้าขานอ้อย 5% ซึ่งเถ้าปาล์มน้ำมันนั้นจะมีคุณสมบัติทางเคมีที่ดีกว่าเถ้าขานอ้อยคือ เถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าLOI ประมาณร้อยละ 10 แต่เถ้าขานอ้อยมีค่า LOI ประมาณร้อยละ 20-30 ซึ่งถ้าหากมี LOI ในปริมาณมากหรือมากกว่าร้อยละ 20 จะส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมนั้นมีค่าการรับกำลังต้านทานแรงอัดได้น้อยลง และจากกราฟทั้งสามสามารถเห็นได้ว่าที่กำลังไมโครเวฟ 720 W โดยใช้ระยะเวลาในการบ่ม 120 ก้อนตัวอย่างรับกำลังต้านทานแรงอัดได้ดีที่สุดเนื่องจากเมื่อใช้กำลังไมโครเวฟต่ำการทำงานของคลื่นไมโครเวฟที่ทำให้เกิดความร้อนภายในความชื้นในก้อนตัวอย่าง กลายเป็นพลังงานความร้อน และเกิดการระเหยออกอย่างช้าๆซึ่งส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างเหมาะสมจึงทำให้รับกำลังต้านทานแรงอัดได้ดีแต่เมื่อใช้กำลังไมโครเวฟมากกว่า 720 Watts และระยะเวลาในการบ่มมากกว่า 120 นาทีขึ้นไปจะทำให้ก้อนคอนกรีตรับกำลังต้านทานแรงอัดได้น้อยลงอย่างรวดเร็วโดยส่งผลมาจากการทำงานของคลื่นไมโครเวฟที่ทำให้เกิดความร้อนภายในความชื้นในก้อนตัวอย่างกลายเป็นพลังงานความร้อนและเกิดการระเหยออกอย่างรวดเร็วซึ่งส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้ลักษณะภายนอกของก้อนตัวอย่างทดสอบเกิดการแตกร้าวบริเวณผิวหน้าคอนกรีตเนื่องจากการระเหยของความชื้นในปริมาณมากเกินไปซึ่งทำให้คุณสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจึงทำให้ก้อนคอนกรีตรับกำลังต้านทานแรงอัดได้น้อยลง





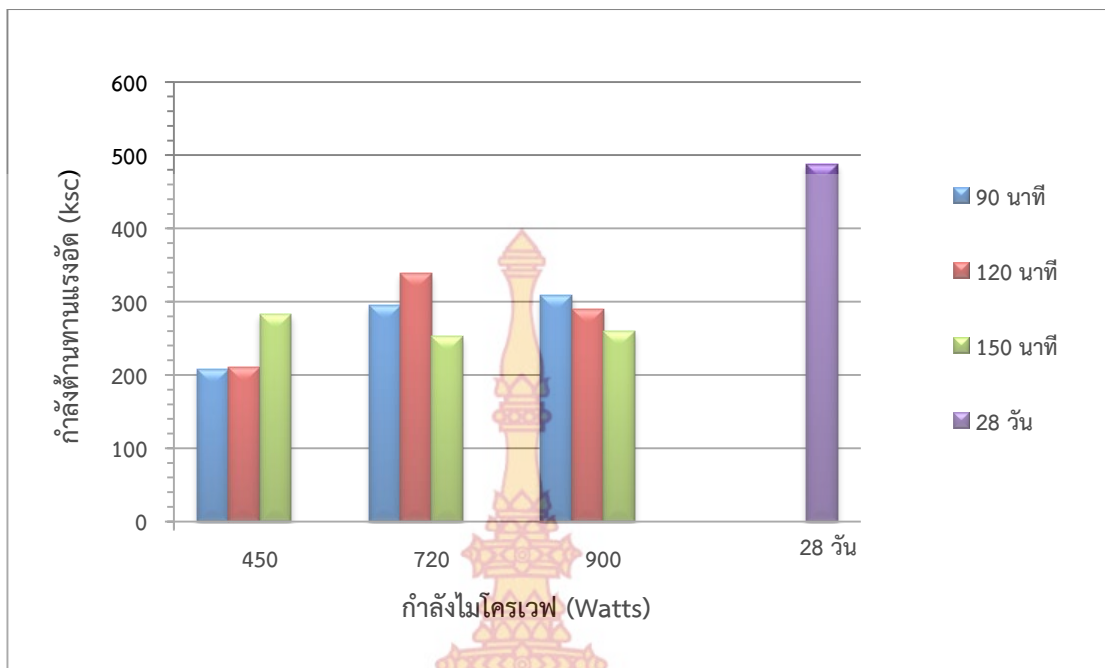
รูปที่ 4-13 กราฟแสดงกำลังต้านทานแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่บ่มด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลา และกำลังวัตต์ต่างๆ ของสัดส่วนผสมเถ้าปาล์ม 5% : เถ้าชานอ้อย 15% เทียบกับการบ่ม 28 วัน

จากกราฟแสดงค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ใช้ระยะเวลา 90, 120, 150 นาทีที่กำลังไมโครเวฟ 450 Watts, 720 Watts และ 900 Watts จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้กำลังไมโครเวฟเริ่มต้นที่ 450 Watts ระยะเวลาที่ทำให้กำลังต้านทานแรงอัดมีค่ามากที่สุดคือ 150 นาที โดยที่ระยะเวลาที่ทำให้กำลังต้านทานแรงอัดมีค่าน้อยที่สุดคือ 90 นาที เมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟเป็น 720 Watts ระยะเวลาที่ทำให้กำลังต้านทานแรงอัดมีค่ามากที่สุดคือ 120 นาที และต่ำสุดที่ระยะเวลา 90 นาที ส่วนที่ กำลังไมโครเวฟ 900 Watts ระยะเวลาที่ทำให้กำลังต้านทานแรงอัดมีค่ามากที่สุดคือ 120 นาที โดยต่ำสุดที่ 150 นาที ซึ่งจากกำลังไมโครเวฟทั้ง 3 ระยะเวลาในการบ่มที่ทำให้กำลังต้านทานแรงอัดมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 720 Watts ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 120 นาที เมื่อนำมาเทียบกับ 28 วัน แล้วจะเห็นว่าที่การบ่ม 28 วัน สามารถรับกำลังต้านทานแรงอัดได้มากกว่าคิดเป็น 37.95% ของการบ่มด้วยไมโครเวฟ



รูปที่ 4-14 กราฟแสดงกำลังต้านทานแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่บ่มด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลาและกำลังวัตต์ต่างๆของสัดส่วนผสมเถ้าปาล์ม 10% : เถ้าชานอ้อย 10% เทียบกับการบ่ม 28 วัน

จากกราฟแสดงค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ใช้ระยะเวลา 90, 120, 150 นาทีที่ กำลังไมโครเวฟ 450 Watts, 720 Watts และ 900 Watts จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้กำลังไมโครเวฟเริ่มต้นที่ 450 Watts ระยะเวลาที่ทำให้กำลังต้านทานแรงอัดมีค่ามากที่สุดคือ 150 นาที โดยที่ระยะเวลาที่ทำให้กำลังต้านทานแรงอัดมีค่าน้อยที่สุดคือ 90 นาที เมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟเป็น 720 Watts ระยะเวลาที่ทำให้กำลังต้านทานแรงอัดมีค่ามากที่สุดคือ 120 นาที และต่ำสุดที่ระยะเวลา 90 นาที ส่วนที่ กำลังไมโครเวฟ 900 Watts ระยะเวลาที่ทำให้กำลังต้านทานแรงอัดมีค่ามากที่สุดคือ 90 นาที โดยต่ำสุดที่ 150 นาที ซึ่งจากกำลังไมโครเวฟทั้ง 3 ระยะเวลาในการบ่มที่ทำให้กำลังต้านทานแรงอัดมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 720 Watts ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 120 นาทีเมื่อนำมาเทียบกับ 28 วันแล้วจะเห็นว่าที่การบ่ม 28 วัน สามารถรับกำลังต้านทานแรงอัดได้มากกว่าคิดเป็น 71% ของการบ่มด้วยไมโครเวฟ



รูปที่ 4-15 กราฟแสดงกำลังต้านทานแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่บ่มด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลา และกำลังวัตต์ต่างๆของสัดส่วนผสมเถ้าปาล์ม 15% : เถ้าชานอ้อย 5% เทียบกับการบ่ม 28 วัน

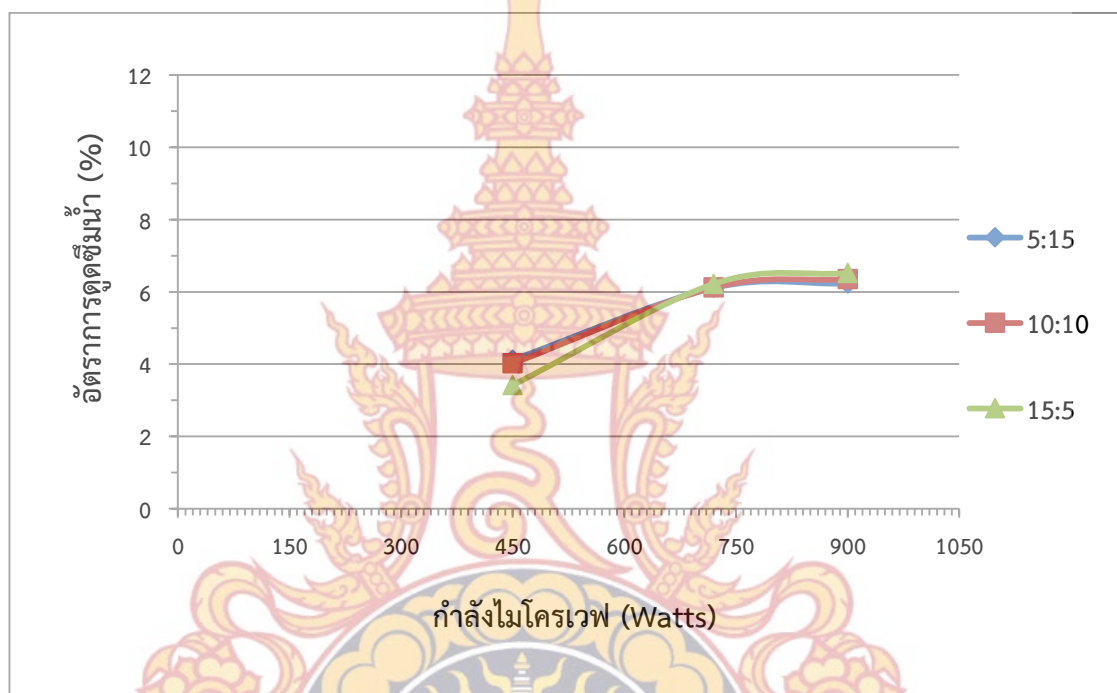
จากกราฟแสดงค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ใช้ระยะเวลา 90, 120, 150 นาทีที่กำลังไมโครเวฟ 450 Watts, 720 Watts และ 900 Watts จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้กำลังไมโครเวฟเริ่มต้นที่ 450 Watts ระยะเวลาที่ทำให้กำลังต้านทานแรงอัดมีค่ามากที่สุดคือ 150 นาที โดยที่ระยะเวลาที่ทำให้กำลังต้านทานแรงอัดมีค่าน้อยที่สุดคือ 90 นาที เมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟเป็น 720 Watts ระยะเวลาที่ทำให้กำลังต้านทานแรงอัดมีค่ามากที่สุดคือ 120 นาที และต่ำสุดที่ระยะเวลา 150 นาที ส่วนที่กำลังไมโครเวฟ 900 Watts ระยะเวลาที่ทำให้กำลังต้านทานแรงอัดมีค่ามากที่สุดคือ 90 นาที โดยต่ำสุดที่ 150 นาที ซึ่งจากกำลังไมโครเวฟทั้ง 3 ระยะเวลาในการบ่มที่ทำให้กำลังต้านทานแรงอัดมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 720 Watts ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 120 นาที เมื่อนำมาเทียบกับ 28 วันแล้วจะเห็นว่าที่การบ่ม 28 วันสามารถรับกำลังต้านทานแรงอัดได้มากกว่าคิดเป็น 44.23% ของการบ่มด้วยไมโครเวฟ

จากกราฟทั้ง 3 แสดงให้เห็นว่า การบ่มที่ 28 วันสามารถรับกำลังต้านทานแรงอัดได้มากกว่า การบ่มที่กำลังไมโครเวฟและระยะเวลาในการบ่มต่างๆ เนื่องจากการบ่ม 28 วันนั้น ทำให้คอนกรีต เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อย่างต่อเนื่องและเหมาะสมมากที่สุดและการบ่มน้ำเป็นการรักษาความชื้น ให้กับก้อนตัวอย่างทดสอบโดยที่ ต้องใช้เวลานานในการบ่ม แต่การบ่มด้วยกำลังไมโครเวฟเป็นการเร่ง กำลังกำลังอัดภายในระยะเวลาสั้นๆ เมื่อเราใช้กำลังไมโครเวฟต่ำและระยะเวลาในการบ่มไม่มากนัก ก็จะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่เพิ่มสูงขึ้น แต่ถ้าหากใช้ระยะเวลาในการบ่มและกำลังไมโครเวฟมากเกินไปจะ ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการทำงานของคลื่นไมโครเวฟที่ทำให้เกิดความร้อนภายใน ความชื้นในก้อนตัวอย่างกลายเป็นพลังงานความร้อน และเกิดการระเหยออกอย่างรวดเร็วซึ่งส่งผล ให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีในก้อนคอนกรีตเปลี่ยนแปลง อย่างรวดเร็วจึงทำให้คอนกรีตรับแรงอัดได้น้อยลงกว่าการบ่มที่ 28 วันแต่มาตรฐาน ACI 318 ได้ กำหนดการยอมรับกำลังของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ทดสอบได้ต้อง ไม่มีตัวอย่างอันใดที่มีกำลังอัดต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้เกิน 3.4 MPa (35 ksc) ข้อกำหนดนี้ใช้ได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับคอนกรีตที่มีกำลังอัดในช่วงระยะ 21 ถึง 34 MPa (214 ถึง 350 ksc) ในกรณีที่ ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงไม่เป็นไปตามข้อกำหนด ควรดูรายละเอียดของผลการ ทดสอบและข้อมูลอื่นประกอบการตัดสินใจ เช่น เมื่อพบว่าผลการทดสอบกำลังอัดของบางตัวอย่าง ต่ำกว่า 3.4 MPa (35 ksc) ไม่มากนัก จะต้องตรวจสอบส่วนผสมและปรับส่วนผสมให้มีกำลังอัดตามที่ ต้องการในการทำงานต่อไป และสำหรับคอนกรีตที่เทไปแล้วให้พิจารณาการพัฒนากำลังและอายุการ ใช้งานเนื่องจากคอนกรีตกำลังสูงมักมีการพัฒนากำลังที่ดีแม้ว่าจะมีอายุมากกว่า 28 วันขึ้นไปและ หากการทำการก่อสร้างอาคารดังกล่าวสามารถยึดออกไปได้ก็ไม่จำเป็นต้องทุบทิ้งและทำใหม่เพราะ กำลังของคอนกรีตอาจสูง



#### 4.4 ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟ ที่ระยะเวลาต่างๆ

ค่าความชื้นทั้งหมด ( Moisture Content ) คือปริมาณน้ำทั้งหมดในมวลรวมทั้งที่อยู่ในช่องว่าง ( Capillary Pores ) และน้ำที่ผิวของมวลรวม ( Free Water ) โดยคำนวณจากผลรวมระหว่างค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวม ( Surface Moisture) โดยแสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำทั้งหมดต่อน้ำหนักของมวลรวมที่สภาพอบแห้ง ( Oven-Dry) สภาพความชื้นจะแบ่งออกเป็น 4 ลักษณะสภาพอบแห้ง สภาพแห้งในอากาศ สภาพอิมตัวผิวแห้ง สภาพเปียก

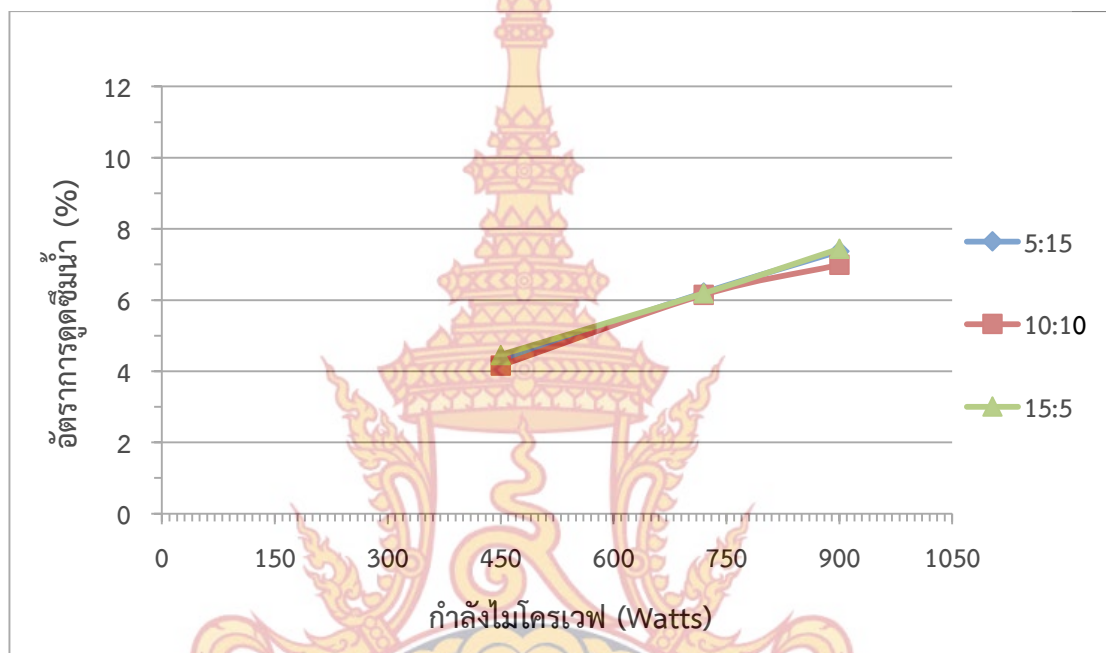


รูปที่ 4-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่างทดสอบกับระยะเวลาในการบ่มด้วยกำลังไมโครเวฟที่ระยะเวลา 90 นาที

จากกราฟแสดงอัตราการดูดซึมน้ำของอัตราส่วนผสม 5:15, 10:10 และ 15:5 ที่กำลังไมโครเวฟ 450 Watts, 750 Watts และ 900 Watts โดยใช้ระยะเวลาในการบ่ม 90 นาที ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้กำลังไมโครเวฟเริ่มต้นที่ 450 Watts ค่าอัตราการดูดซึมน้ำของอัตราส่วน 5:15 จะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 4.12 ส่วนอัตราส่วนผสม 15:5 จะมีค่าอัตราการดูดซึมน้ำที่น้อยที่สุดเท่ากับ 3.42 แต่เมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟขึ้นเป็น 750 Watts ค่าอัตราการดูดซึมน้ำจะมีค่าใกล้เคียงกันโดยที่อัตราส่วน 15:5 จะมีค่าอัตราการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นและมากที่สุดเท่ากับ 6.22 เมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟเป็น 900 Watts ค่าอัตราการดูดซึมน้ำทั้งสามอัตราส่วนมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันโดยที่อัตราส่วนผสม 15:5 ก็จะมีค่าอัตราการดูดซึมน้ำที่มากที่สุดเช่นเดิมโดยที่อัตราส่วน 5:15 จะมีค่าอัตราการดูดซึมน้ำที่น้อยที่สุดซึ่งจากการที่ค่าอัตราการดูดซึมน้ำนั้นส่งผลให้เราทราบว่าอัตราส่วนผสม 15:5 มีปริมาณความชื้นที่ระเหยหลังจากการบ่มมากและคุณสมบัติทางกายภาพของเจ้าปาล์มกับเจ้าชานอ้อยจะต่างกันโดยที่

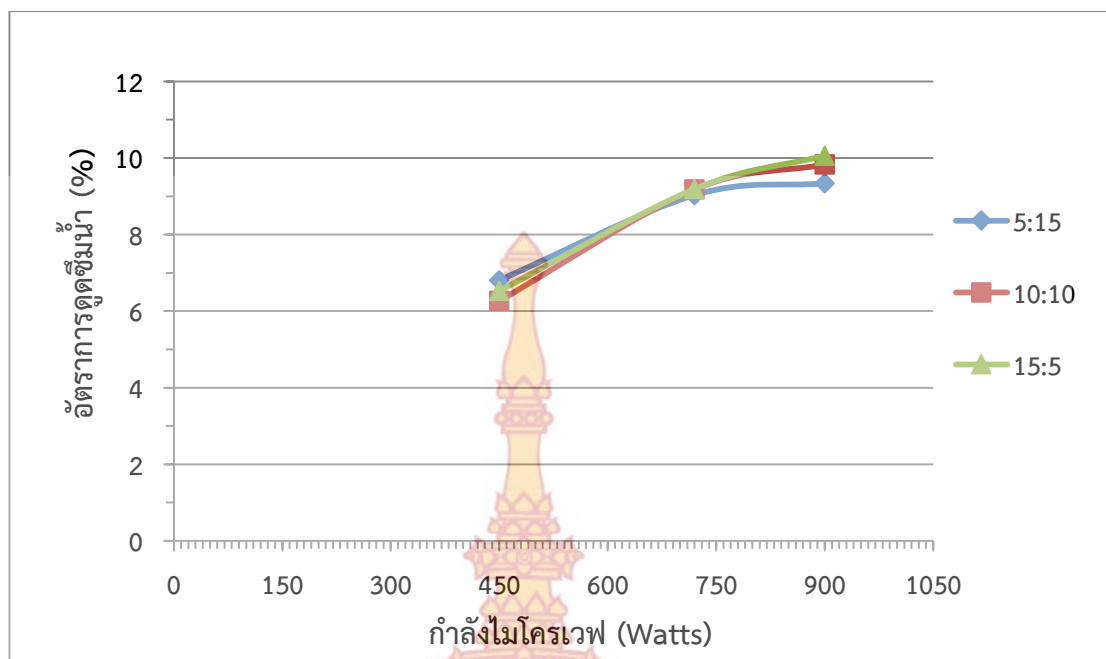


ถ้าปาล์มจะมีรูปร่างกลมติดต่อกันเป็นกลุ่มก้อนและขนาดไม่เท่ากันแต่ถ้าชานอ้อยจะมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมไม่แน่นอนจึงทำให้เมื่อใช้ส่วนผสมถ้าปาล์มในปริมาณที่มากกว่าก็จะทำให้ก้อนตัวอย่างทดสอบเกิดช่องว่างและความพรุนภายในก้อนตัวอย่างมากขึ้นจึงทำให้มีอัตราการดูดซึมน้ำสูงและถ้าหากก้อนตัวอย่างทดสอบมีอัตราการดูดซึมน้ำสูงก็จะส่งผลให้คอนกรีตรับกำลังต้านทานแรงอัดได้น้อยลง



รูปที่ 4-17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่างทดสอบกับระยะเวลาในการบ่มด้วยกำลังไมโครเวฟที่ระยะเวลา 120 นาที

จากกราฟแสดงอัตราการดูดซึมน้ำของอัตราส่วนผสม 5:15, 10:10 และ 15:5 ที่กำลังไมโครเวฟ 450 Watts, 750 Watts และ 900 Watts โดยใช้ระยะเวลาในการบ่ม 120 นาที ซึ่งจะเห็นว่าทั้งสามอัตราส่วนมีแนวโน้มสูงขึ้นเป็นเส้นตรงโดยที่กำลังไมโครเวฟยิ่งสูงขึ้นอัตราการดูดซึมน้ำก็ยิ่งมากขึ้นด้วยซึ่งอัตราส่วนผสม 15:5 มีอัตราการดูดซึมน้ำมากที่สุดที่กำลังไมโครเวฟ 450 Watts และ 900 Watts และอัตราส่วนผสม 5:15 และ 10:10 ก็มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจากการหาค่าอัตราการดูดซึมน้ำนั้นส่งผลให้เราทราบว่าอัตราส่วนผสม 15:5 เมื่อกำลังไมโครเวฟยิ่งสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณความชื้นที่ระเหยหลังจากการบ่มมากขึ้นปริมาณความชื้นภายในก้อนตัวอย่างทดสอบน้อยลงและคุณสมบัติทางกายภาพของปาล์มจะมีรูปร่างกลมติดต่อกันเป็นกลุ่มก้อนและขนาดไม่เท่ากันจึงทำให้เมื่อใช้ส่วนผสมถ้าปาล์มในปริมาณที่มากกว่าก็จะทำให้ก้อนตัวอย่างทดสอบเกิดช่องว่างและความพรุนภายในก้อนตัวอย่างมากขึ้นจึงทำให้มีอัตราการดูดซึมน้ำสูงและถ้าหากก้อนตัวอย่างทดสอบมีอัตราการดูดซึมน้ำสูงก็จะส่งผลให้คอนกรีตรับกำลังต้านทานแรงอัดได้น้อยลง



รูปที่ 4-18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่างทดสอบกับระยะเวลาในการต้มด้วยกำลังไมโครเวฟที่ระยะเวลา 150 นาที

จากกราฟแสดงอัตราการดูดซึมน้ำของอัตราส่วนผสม 5:15, 10:10 และ 15:5 ที่กำลังไมโครเวฟ 450 Watts, 750 Watts และ 900 Watts โดยใช้ระยะเวลาในการต้ม 150 นาที ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อใช้กำลังไมโครเวฟเริ่มต้นที่ 450 Watts ค่าอัตราการดูดซึมน้ำของอัตราส่วน 5:15 จะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 6.81 ส่วนอัตราส่วนผสม 10:10 จะมีค่าอัตราการดูดซึมน้ำที่น้อยที่สุดเท่ากับ 6.27 แต่เมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟขึ้นเป็น 750 Watts ค่าอัตราการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสามอัตราส่วนเมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟเป็น 900 Watts ค่าอัตราการดูดซึมน้ำทั้งสามอัตราส่วนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนผสม 15:5 ก็จะมีค่าอัตราการดูดซึมน้ำที่มากที่สุดเท่ากับ 10.06 โดยที่อัตราส่วน 5:15 จะมีค่าอัตราการดูดซึมน้ำที่น้อยที่สุดเท่ากับ 9.34 ซึ่งจากการที่หาอัตราการดูดซึมน้ำนั้นส่งผลให้เราทราบว่าอัตราส่วนผสม 15:5 มีปริมาณความชื้นที่ระเหยหลังจากการต้มมากเนื่องจากใช้ระยะเวลาในการต้มนานและเมื่อกำลังไมโครเวฟยิ่งสูงความชื้นที่อยู่ภายในก้อนตัวอย่างทดสอบยิ่งน้อยลงมากและคุณสมบัติทางกายภาพของแก้วปาล์มจะมีรูปร่างกลมติดต่อกันเป็นกลุ่มก้อนและขนาดไม่เท่ากัน จึงทำให้เมื่อใช้ส่วนผสมแก้วปาล์มในปริมาณที่มากกว่าก็จะทำให้ก้อนตัวอย่างทดสอบเกิดช่องว่างและความพรุนภายในก้อนตัวอย่างมากขึ้นจึงทำให้มีอัตราการดูดซึมน้ำสูงและถ้าหากก้อนตัวอย่างทดสอบมีอัตราการดูดซึมน้ำสูงก็จะส่งผลให้คอนกรีตรับกำลังต้านทานแรงอัดได้น้อยลงเช่นกัน

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

การพิจารณาการบ่มคอนกรีตกำลังสูงที่มีส่วนผสมของวัสดุชีวมวลที่ทำการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟเพื่อต้องการหาอัตราส่วนผสมระยะเวลาในการบ่มและกำลังวัตต์ที่เหมาะสมที่สามารถทำให้อ่อนคอนกรีตรับกำลังต้านทานแรงอัดได้ดีที่สุด โดยจะนำค่าที่ได้จากการทดสอบการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระยะเวลาและกำลังวัตต์ต่างๆมาเปรียบเทียบกับบ่มในน้ำที่ 28 วัน โดยที่ก้อนคอนกรีตจะต้องมีค่ากำลังต้านทานรับแรงอัด 450 ksc ขึ้นไป

#### 5.1 สรุป

จากการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบและกราฟแสดงความสัมพันธ์ของการบ่มก้อนคอนกรีตกำลังสูงที่มีส่วนผสมของวัสดุชีวมวลโดยการนำเอาพลังงานไมโครเวฟมาใช้เป็นการควบคุมความชื้นในก้อนคอนกรีตตามเวลาและวัตต์ที่ทำการทดสอบพบว่าอัตราส่วนผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 15% ต่อเถ้าชานอ้อย 5% โดยใช้กำลังไมโครเวฟที่ 720 Watts ที่ระยะเวลาในการบ่ม 120 นาที เป็นอัตราส่วนและเป็นระยะเวลาในการบ่มที่ดีและเหมาะสมโดยที่มีค่าของกำลังต้านทานแรงอัดได้สูงสุดเท่ากับ 338.10 ksc เมื่อเทียบกับการทดสอบที่อัตราส่วนและระยะเวลาของกำลังวัตต์อื่นๆ ที่ใช้ในการทดสอบส่วนการบ่มในน้ำที่ระยะเวลา 28 วัน แสดงค่ากำลังต้านทานแรงอัดได้เท่ากับ 487.64 ksc เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำจากการทดสอบการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมากที่สุดได้เท่ากับ ร้อยละ 10.06 ของอัตราส่วนผสม 15:5 ที่ระยะเวลาในการบ่มที่ 150 นาที กำลังไมโครเวฟ 900 Watts ส่วนการบ่มในน้ำที่ 28 วันการดูดซึมน้ำร้อยละ 3.61 ซึ่งการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟในการทดสอบมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำที่สูงมากกว่า เนื่องจากการนำพลังงานไมโครเวฟเข้ามาไล่ความชื้นออกจากก้อนคอนกรีตในระยะเวลาที่รวดเร็วจะส่งผลต่อปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำคือปริมาณความชื้นในวัสดุน้อยจนไม่เพียงพอต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of Hydration) และวัสดุชีวมวลที่ใช้เป็นส่วนผสมเถ้าปาล์มน้ำมันกับเถ้าชานอ้อยจะต่างกันโดยที่เถ้าปาล์มจะมีรูปร่างกลมติดต่อกันเป็นกลุ่มก้อนและขนาดไม่เท่ากัน แต่เถ้าชานอ้อยจะมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมไม่แน่นอนทำให้อ่อนคอนกรีตเกิดช่องว่างและความพรุนสูงภายในก้อนคอนกรีตมาก เมื่อนำมาทดสอบด้วยการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ให้ความร้อนจากภายในวัสดุซึ่งมีการกระจายตัวของอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งปริมาณก้อนคอนกรีตโดยที่ความชื้นที่กระจายตัวอยู่ในก้อนคอนกรีตถูกไล่ออกโดยการแทรกตัวตามช่องว่างภายในออกสู่ผิวคอนกรีต ส่งผลให้ก้อนคอนกรีตเกิดรอยแตกกร้าวเล็กๆ ภายในโครงสร้างมีผลต่อการดูดซึมน้ำที่มาก และกำลังต้านทานแรงอัดที่ต่ำแต่พลังงานไมโครเวฟก็สามารถควบคุมความชื้นในก้อนคอนกรีตและสามารถเร่งกำลังต้านทานรับแรงอัดในก้อนคอนกรีตเพิ่มขึ้นได้ในช่วงต้น โดยควบคุมที่ระยะเวลาและกำลังวัตต์เป็นสำคัญ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการบ่มคอนกรีตกำลังสูงด้วยเตาอบไมโครเวฟที่ใช้วัสดุซีเมนต์เป็นส่วนผสม มีข้อเสนอแนะ ดังนี้

- 1) ควรศึกษาคุณภาพของวัสดุซีเมนต์ทั้งเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าชานอ้อยก่อนจะทำการทดสอบให้ดี เพื่อจะได้วัสดุซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการทำการทดสอบ
- 2) ผลการทดสอบที่ได้จากการบ่มด้วยไมโครเวฟ เมื่อเทียบกับการบ่มที่ 28 วัน แตกต่างกันค่อนข้างมากควรที่จะนำไปเปรียบเทียบกับบ่มที่ 7 และ 14 วันจะได้ค่าที่ชัดเจนขึ้น
- 3) ควรลดระยะเวลาและกำลังไมโครเวฟลงให้น้อยกว่า 150 นาทีและน้อยกว่า 900 Watts เพื่อให้ได้ค่าการทดสอบที่เหมาะสมมากขึ้น
- 4) ควรศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้วัสดุซีเมนต์เป็นส่วนผสม เช่น ด้านการต้านทานไฟ ด้านการต้านทานสารเคมี ด้านการนำความร้อน เพื่อความเหมาะสมในการนำไปใช้งานก่อสร้าง



## บรรณานุกรม

- [1] ประเสริฐ ,ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2551. Cement Pozzolan and Concrete. พิมพ์ครั้งที่ 5 : สมาคมคอนกรีต
- [2] จตุวุฒิ สินตาวิสูทธิ์ และคณะ. 2547. การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงตามเป้าหมายที่อายุ 24 ชั่วโมง. มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [3] อภิเดช หล้าปิ่น และคณะ. 2547. การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูง. มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [4] ณีรัฐภูมิ สุวรรณภูมิ และคณะ. 2550. การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง. หน่วยงานวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)
- [5] พงศธร จันทรตรี. 2552. การศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าขานอ้อย. ปริญญาณินท์ (เทคโนโลยีโยธา). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [6] ชัชวาล เศรษฐบุต. 2536. คอนกรีตเทคโนโลยี. คอนกรีตผสมเสร็จจซีแพค. บริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด .





ภาคผนวก




ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบหาค่าความถี่จำเพาะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ

## ตารางที่ ก-1 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล			
	การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ SPECIFIC GRAVITY OF PORTLAND CEMENT			
Project Name : การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์				
Location : RMUTR/KKW			Date of Test : 10 มกราคม 2555	
Checked by : อ. ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล			Test by : น.ส. กนกกาญจน์ ทองขี้ม	
SPECIFIC GRAVITY OF PORTLAND CEMENT				
SAMPLE NO.	TYPE OF CEMENT	WT.OF CEMENT (g)	VOLUME OF CEMENT (cm <sup>3</sup> )	SPECIFIC GRAVITY OF CEMENT
1	1	64.00	20.30	3.15
2	1	64.00	20.10	3.18
3	1	64.00	20.50	3.12
Average				3.15

SPECIFIC GRAVITY OF HYDRAULIC CEMENT

$$G_c = \frac{W_c}{V_c \cdot \gamma_w}$$

$G_c$  = ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์


$W_c$  = น้ำหนักของปูนซีเมนต์

$V_c$  = ปริมาตรของปูนซีเมนต์

$\gamma_w$  = หน่วยน้ำหนักของน้ำที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 1 g/cm<sup>3</sup>




ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าปาล์มน้ำมัน  
 ตารางที่ ก-2 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าปาล์มน้ำมัน


	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล			
	การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าปาล์มน้ำมัน SPECIFIC GRAVITY OF PALM OIL FUEL ASH			
Project Name : การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าปาล์มน้ำมัน				
Location : RMUTR/KKW			Date of Test : 10 มกราคม 2555	
Checked by : อ. ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล			Test by : น.ส. กนกกาญจน์ ทองขี้ม	
SPECIFIC GRAVITY OF PORTLAND CEMENT				
SAMPLE NO.	TYPE OF PALM OIL FUEL ASH	WT. OF PALM OIL FUEL ASH (g)	VOLUME OF PALM OIL FUEL ASH (cm <sup>3</sup> )	SPECIFIC GRAVITY OF PALM OIL FUEL ASH
1	-	30.00	22.80	1.32
2	-	30.00	18.80	1.60
3	-	30.00	19.20	1.56
Average				1.50

## ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าชานอ้อย

## ตารางที่ ก-3 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าชานอ้อย


	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล			
	การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าชานอ้อย SPECIFIC GRAVITY OF BAGASSE ASH			
Project Name : <u>การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าชานอ้อย</u>				
Location : <u>RMUTR/KKW</u>			Date of Test : <u>10 มกราคม 2555</u>	
Checked by : <u>อ. ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล</u>			Test by : <u>น.ส. กนกกาญจน์ ทองขี้ม</u>	
SPECIFIC GRAVITY OF PORTLAND CEMENT				
SAMPLE NO.	TYPE OF BAGASSE ASH	WT. OF BAGASSE ASH (g)	VOLUME OF BAGASSE ASH (cm <sup>3</sup> )	SPECIFIC GRAVITY OF BAGASSE ASH
1	-	50.00	23.00	2.17
2	-	50.00	23.00	2.17
3	-	50.00	23.10	2.16
Average				2.17

ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด  
 ตารางที่ ก-4 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด

	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล		
	การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด SPECIFIC GRAVITY AND ABSORPTION OF FINE AGGREGATE		
Project Name : การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด			
Location : RMUTR/KKW		Date of Test : 11 มกราคม 2555	
Checked by : อ. ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล		Test by : น.ส. สุคันธา รัตน์นะ	
SPECIFIC GRAVITY AND ABSORPTION OF FINE AGGREGATE			
DETERMINATION	1	2	3
WT. SAND (SSD)	500.00	500.00	500.00
WT. FLASK+SAND (SSD) + WATER ;gm.	957.50	956.80	958.70
TEMPERATURE C <sup>o</sup>	21.00	21.00	21.00
WT. BOWL; gm	137.80	136.70	138.70
WT. BOWL+DRY SAND ;gm	628.90	620.20	623.00
DRY SAND ; gm	491.10	483.50	484.30
Average : DRY SAND	486.30		
WT. FLASK	166.80	166.80	166.80
BULK SPECIFIC GRAVITY	2.72	2.69	2.69
Average : BULK SPECIFIC GRAVITY	2.70		
BULK SPECIFIC GRAVITY (SSD)	2.77	2.78	2.78
Average : BULK SPECIFIC GRAVITY (SSD)	2.78		
APPARENT SPECIFIC GRAVITY	2.87	2.96	2.95
Average : APPARENT SPECIFIC GRAVITY	2.92		
PERCENT ABSORTION (%)	1.81	3.41	3.24
Average : PERCENT ABSORTION (%)	2.82		


## ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ

## ตารางที่ ก-5 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ

	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล		
	การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ SPECIFIC GRAVITY AND ABSORPTION OF COARSE AGGREGATE		
Project Name : การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ			
Location : <u>RMUTR/KKW</u>		Date of Test : <u>13 มกราคม 2555</u>	
Checked by : <u>อ. ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล</u>		Test by : <u>น.ส. สุคันธา รัตน์ะ</u>	
SPECIFIC GRAVITY AND ABSORPTION OF COARSE AGGREGATE			
TEST NO.	1	2	3
CONTAINER NO.	1	2	3
WT. CONTAINER + COARSE AGGREGATE(SSD);gm	5090.00	5120.00	5100.00
WT. CONTAINER + DRY COARSE AGGREGATE ;gm	5060.00	5100.00	5065.00
WT. CONTAINER ;gm	90.00	120.00	100.00
COARSE AGGREGATE (SSD) ;gm	5000.00	5000.00	5000.00
DRY COARSE AGGREGATE;gm	4970.00	4980.00	4965.00
WT. SAT.COARSE AGGREGATE IN WATER;gm	3200.00	3260.00	3230.00
BULK SPECIFIC GRAVITY(OVEN DRY BASIS)	2.76	2.86	2.81
Average : BULK SPECIFIC GRAVITY (OVEN DRY BASIS)	2.81		
BULK SPECIFIC GRAVITY (SSD BASIS)	2.78	2.87	2.82
Average : BULK SPECIFIC GRAVITY (SSD BASIS)	2.82		
APPARENT SPECIFIC GRAVITY	2.81	2.89	2.86
Average : APPARENT SPECIFIC GRAVITY	2.85		
% Absorptions	0.60	0.40	0.70
Average : % Absorptions	0.57		

## ผลการทดสอบความต้านทานต่อการขัดสีของมวลรวมโดยใช้เครื่องลอสแองเจอลิส

ตารางที่ ก-6 การทดสอบความต้านทานต่อการขัดสีของมวลรวมโดยใช้เครื่องลอสแองเจอลิส

 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล การทดสอบความต้านทานต่อการขัดสีของมวลรวมโดยใช้เครื่องลอสแองเจอลิส ABRASIONTEST OF COARSE AGGREGATE BY USE OF THE LOSS ANGLES				
ProjectName : การทดสอบความต้านทานต่อการขัดสีของมวลรวมโดยใช้เครื่องลอสแองเจอลิส				
Location : RMUTR/KKW			Date of Test : 16 มกราคม 2555	
Checked by : อ. ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล			Test by : นาย สุธี แสงนคร	
ABRASIONTEST OF COARSE AGGREGATE BY USE OF THE LOSS ANGLES				
SIEVE NO.PASSING	SIEVE NO. RETAINE	WEIGHT (gm)	WEIGHT USED (gm)	
3"	2 ½"	0.00	0.00	
2 ½"	2"	0.00	0.00	
2"	1 ½"	0.00	0.00	
1 ½"	1"	0.00	0.00	
1"	¾"	0.00	0.00	
¾"	½"	2500.00	2500.00	
½"	3/8"	2500.00	2500.00	
3/8"	¼"	0.00	0.00	
¼"	#4	0.00	0.00	
#4	#8	0.00	0.00	
SUM		5000.00	5000.00	
TOTAL WT. USED (A)		=	5000.00	gm.
TOTAL WT. RETAIN # 12 (B)		=	3926.00	gm.
PERCENT OF WEAR (A - B) / A		=	21.48	%



ภาคผนวก ข  
ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง



































ภาคผนวก ค  
ผลการทดสอบหาค่ากำลังต้านทานรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง





























ภาคผนวก ง  
ผลการทดสอบหาปริมาณการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่าง























ภาคผนวก จ  
รูปประกอบการทดสอบ

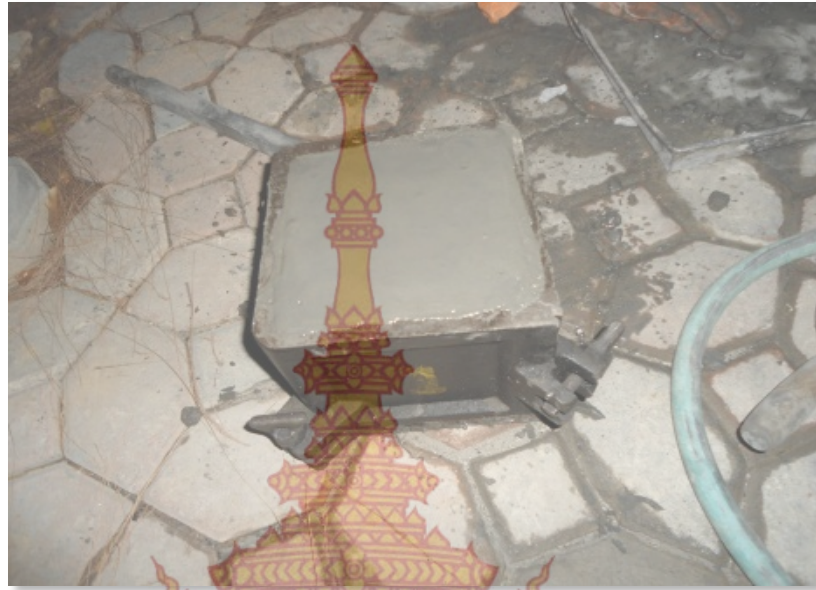




รูปที่ จ-1 รูปการร่อนวัสดุชีวมวลด้วยเครื่องเขย่า



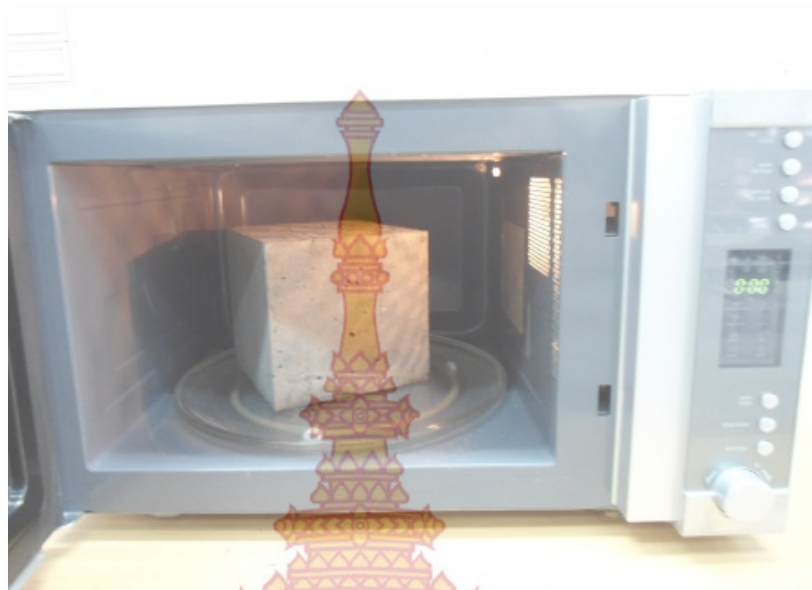
รูปที่ จ-2 รูปวัสดุชีวมวลที่ร่อนด้วยเครื่องเขย่าแล้ว



รูปที่ จ-3 รูปการหล่อก้อนตัวอย่าง



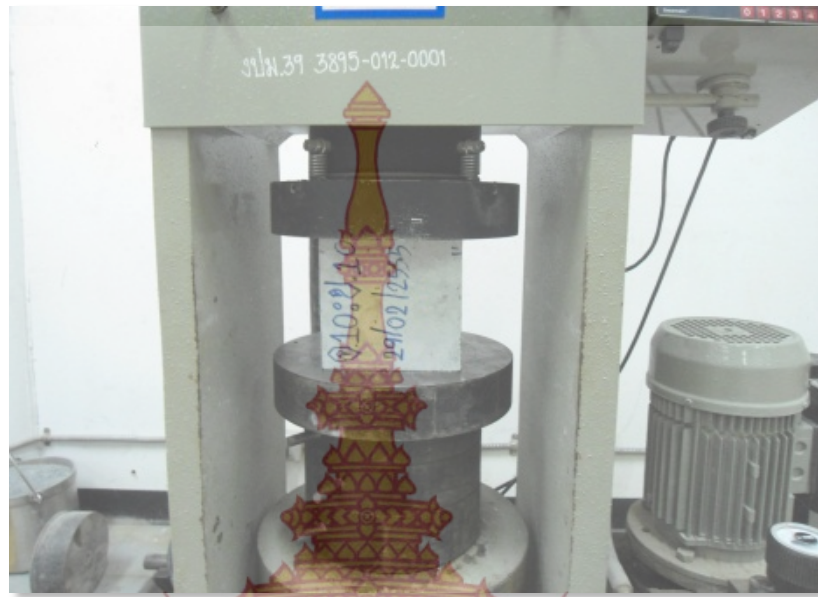
รูปที่ จ-4 รูปก้อนตัวอย่างทดสอบหลังการถอดแบบหล่อ



รูปที่ จ-5 รูปการบ่มก้อนตัวอย่างทดสอบด้วยไมโครเวฟ



รูปที่ จ-6 รูปการชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่าง



รูปที่ จ-7 รูปการชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่าง



รูปที่ จ-8 รูปลักษณะภายในก้อนตัวอย่างหลังการปรม



ตารางที่ ข-1 การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง 90 นาที กำลังไฟ 450 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 90 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม : เถ้าปาล์มน้ำมัน : เถ้าขานอ้อย	ก้อน ตัวอย่าง ทดสอบ	ปริมาตร ก้อน ตัวอย่าง (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง ก่อนอบ (g)	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง หลังอบ (g)	ความ หนาแน่น ก้อนตัวอย่าง ก่อนอบ (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น ก้อนตัวอย่าง หลังอบ (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น ก้อนตัวอย่าง ก่อนอบเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น ก้อนตัวอย่าง หลังอบเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง ก่อนอบเฉลี่ย (g)	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง หลังอบเฉลี่ย (g)
450	5:15	1	3,375.00	8,060.00	7,740.00	2.39	2.29	2.39	2.30	8,080.00	7,746.67
		2	3,375.00	8,080.00	7,720.00	2.39	2.29				
		3	3,375.00	8,100.00	7,780.00	2.40	2.31				
	10:10	1	3,375.00	7,957.00	7,647.00	2.36	2.27	2.38	2.29	8,025.67	7,720.00
		2	3,375.00	8,026.00	7,720.00	2.38	2.29				
		3	3,375.00	8,094.00	7,793.00	2.40	2.31				
	15:5	1	3,375.00	7,918.00	7,656.00	2.35	2.27	2.36	2.27	7,952.00	7,660.67
		2	3,375.00	7,994.00	7,639.00	2.37	2.26				
		3	3,375.00	7,944.00	7,687.00	2.35	2.28				

ตารางที่ ข-2 การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง 90 นาที่ กำลังไฟ 720 Watts

ระยะเวลาใน การบ่ม 90 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม : เถ้าปาล์มน้ำมัน : เถ้าขานอ้อย	ก้อน ตัวอย่าง ทดสอบ	ปริมาตร ก้อนตัวอย่าง (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง ก่อนอบ (g)	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง หลังอบ (g)	ความ หนาแน่น ก้อนตัวอย่าง ก่อนอบ (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น หลังอบ (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น ก่อนอบเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น หลังอบเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง ก่อนอบเฉลี่ย (g)	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง หลังอบเฉลี่ย (g)
720	5:15	1	3,375.00	8,009.00	7,547.00	2.37	2.24	2.38	2.24	8,021.67	7,559.33
		2	3,375.00	8,001.00	7,547.00	2.37	2.24				
		3	3,375.00	8,055.00	7,584.00	2.39	2.25				
	10:10	1	3,375.00	8,096.00	7,597.00	2.40	2.25	2.38	2.24	8,027.00	7,554.00
		2	3,375.00	8,006.00	7,553.00	2.37	2.24				
		3	3,375.00	7,979.00	7,512.00	2.36	2.23				
	15:5	1	3,375.00	8,033.00	7,542.00	2.38	2.23	2.39	2.25	8,064.00	7,578.33
		2	3,375.00	8,103.00	7,626.00	2.40	2.26				
		3	3,375.00	8,056.00	7,567.00	2.39	2.24				

ตารางที่ ข-3 การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง 90 นาที กำลังไฟ 900 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 90 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม : เถ้าปาล์มน้ำมัน : เถ้าชานอ้อย	ก้อน ตัวอย่าง ทดสอบ	ปริมาตร ก้อนตัวอย่าง ( cm <sup>3</sup> )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง ก่อนอบ ( g )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง หลังอบ ( g )	ความ หนาแน่น ก้อนตัวอย่าง ก่อนอบ (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น ก้อนตัวอย่าง หลังอบ (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น ก้อนตัวอย่าง ก่อนอบเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น ก้อนตัวอย่าง หลังอบเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง ก่อนอบเฉลี่ย ( g )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง หลังอบเฉลี่ย ( g )
900	5:15	1	3,375.00	8,103.00	7,574.00	2.40	2.24	2.38	2.24	8,044.33	7,546.33
		2	3,375.00	8,043.00	7,569.00	2.38	2.24				
		3	3,375.00	7,987.00	7,496.00	2.37	2.22				
	10:10	1	3,375.00	8,100.00	7,500.00	2.40	2.22	2.39	2.24	8,073.33	7,570.00
		2	3,375.00	8,040.00	7,670.00	2.38	2.27				
		3	3,375.00	8,080.00	7,540.00	2.39	2.23				
	15:5	1	3,375.00	8,039.00	7,532.00	2.38	2.23	2.40	2.25	8,101.67	7,591.67
		2	3,375.00	8,187.00	7,698.00	2.43	2.28				
		3	3,375.00	8,079.00	7,545.00	2.39	2.24				

ตารางที่ ข-4 การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง 120 นาที กำลังไฟ 450 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 120 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม : เถ้าขานอ้อย	ก้อน ตัวอย่าง ทดสอบ	ปริมาตร ก้อนตัวอย่าง (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง ก่อนอบ (g)	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง หลังอบ (g)	ความ หนาแน่น ก้อนตัวอย่าง ก่อนอบ (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น หลังอบ (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น ก่อนอบเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น หลังอบเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง ก่อนอบเฉลี่ย (g)	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง หลังอบเฉลี่ย (g)
450	5:15	1	3,375.00	7,945.00	7,527.00	2.35	2.23	2.35	2.23	7,947.33	7,535.67
		2	3,375.00	7,932.00	7,500.00	2.35	2.22				
		3	3,375.00	7,965.00	7,580.00	2.36	2.25				
	10:10	1	3,375.00	7,980.00	7,593.00	2.36	2.25	2.37	2.25	8,000.00	7,605.33
		2	3,375.00	7,960.00	7,573.00	2.36	2.24				
		3	3,375.00	8,060.00	7,650.00	2.39	2.27				
	15:5	1	3,375.00	7,938.00	7,489.00	2.35	2.22	2.37	2.25	7,996.67	7,581.33
		2	3,375.00	8,004.00	7,655.00	2.37	2.27				
		3	3,375.00	8,048.00	7,600.00	2.38	2.25				

ตารางที่ ข-5 การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง 120 นาที่ กำลังไฟ 720 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 120 นาที่/Watts	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน : เถ้าขานอ้อย	ก้อน ตัวอย่าง ทดสอบ	ปริมาตร ก้อนตัวอย่าง ( cm <sup>3</sup> )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง ก่อนอบ ( g )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง หลังอบ ( g )	ความ หนาแน่น ก้อนตัวอย่าง ก่อนอบ (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น ก้อนตัวอย่าง หลังอบ (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น ก้อนตัวอย่าง ก่อนอบเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น ก้อนตัวอย่าง หลังอบเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง ก่อนอบเฉลี่ย ( g )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง หลังอบเฉลี่ย ( g )
720	5:15	1	3,375.00	7,959.00	7,445.00	2.36	2.21	2.36	2.21	7,951.00	7,457.00
		2	3,375.00	7,973.00	7,513.00	2.36	2.23				
		3	3,375.00	7,921.00	7,413.00	2.35	2.20				
	10:10	1	3,375.00	8,069.00	7,550.00	2.39	2.24	2.38	2.24	8,041.33	7,558.67
		2	3,375.00	8,045.00	7,505.00	2.38	2.22				
		3	3,375.00	8,010.00	7,621.00	2.37	2.26				
	15:5	1	3,375.00	8,075.00	7,617.00	2.39	2.26	2.36	2.22	7,969.67	7,476.67
		2	3,375.00	7,822.00	7,300.00	2.32	2.16				
		3	3,375.00	8,012.00	7,513.00	2.37	2.23				

ตารางที่ ข-6 การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง 120 นาที กำลังไฟ 900 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 120 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม : เถ้าขานอ้อย	ก้อน ตัวอย่าง ทดสอบ	ปริมาตร ก้อนตัวอย่าง ( cm <sup>3</sup> )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง ก่อนอบ ( g )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง หลังอบ ( g )	ความ หนาแน่น ก่อนตัวอย่าง ก่อนอบ (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น ก่อนตัวอย่าง หลังอบ (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น ก่อนตัวอย่าง ก่อนอบเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น ก่อนตัวอย่าง หลังอบเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง ก่อนอบเฉลี่ย ( g )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง หลังอบเฉลี่ย ( g )
900	5:15	1	3,375.00	7,969.00	7,444.00	2.36	2.21	2.36	2.19	7,949.67	7,384.67
		2	3,375.00	7,967.00	7,397.00	2.36	2.19				
		3	3,375.00	7,913.00	7,313.00	2.34	2.17				
	10:10	1	3,375.00	8,019.00	7,489.00	2.38	2.22	2.39	2.22	8,055.67	7,495.00
		2	3,375.00	8,028.00	7,473.00	2.38	2.21				
		3	3,375.00	8,120.00	7,523.00	2.41	2.23				
	15:5	1	3,375.00	7,927.00	7,375.00	2.35	2.19	2.35	2.18	7,928.67	7,357.00
		2	3,375.00	7,929.00	7,346.00	2.35	2.18				
		3	3,375.00	7,930.00	7,350.00	2.35	2.18				

ตารางที่ ข-7 การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง 150 นาที กำลังไฟ 450 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 150 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม : เถ้าขานอ้อย	ก้อน ตัวอย่าง ทดสอบ	ปริมาตร ก้อนตัวอย่าง ( cm <sup>3</sup> )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง ก่อนอบ ( g )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง หลังอบ ( g )	ความ หนาแน่น ก้อนตัวอย่าง ก่อนอบ (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น ก้อนตัวอย่าง หลังอบ (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น ก้อนตัวอย่าง ก่อนอบเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น ก้อนตัวอย่าง หลังอบเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง ก่อนอบเฉลี่ย ( g )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง หลังอบเฉลี่ย ( g )
450	5:15	1	3,375.00	8,081.00	7,584.00	2.39	2.25	2.39	2.24	8,071.00	7,576.33
		2	3,375.00	8,012.00	7,520.00	2.37	2.23				
		3	3,375.00	8,120.00	7,625.00	2.41	2.26				
	10:10	1	3,375.00	8,068.00	7,619.00	2.39	2.26	2.40	2.26	8,089.00	7,622.33
		2	3,375.00	8,102.00	7,584.00	2.40	2.25				
		3	3,375.00	8,097.00	7,664.00	2.40	2.27				
	15:5	1	3,375.00	7,915.00	7,435.00	2.35	2.20	2.37	2.22	7,982.00	7,502.33
		2	3,375.00	8,021.00	7,540.00	2.38	2.23				
		3	3,375.00	8,010.00	7,532.00	2.37	2.23				

ตารางที่ ข-8 การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง 150 นาที่ กำลังไฟ 720 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม	อัตราส่วนผสม : เถ้าปาล์มน้ำมัน : เถ้าขานอ้อย	ก้อน ตัวอย่าง ทดสอบ	ปริมาตร ก้อนตัวอย่าง (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง ก่อนอบ (g)	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง หลังอบ (g)	ความ หนาแน่น ก่อนตัวอย่าง ก่อนอบ (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น หลังอบ (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น ก่อนตัวอย่าง ก่อนอบเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น หลังอบเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง ก่อนอบเฉลี่ย (g)	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง หลังอบเฉลี่ย (g)
150 นาที/Watts	5:15	1	3,375.00	7,947.00	7,447.00	2.35	2.21	2.36	2.21	7,955.67	7,459.67
		2	3,375.00	7,963.00	7,473.00	2.36	2.21				
		3	3,375.00	7,957.00	7,459.00	2.36	2.21				
	10:10	1	3,375.00	8,006.00	7,506.00	2.37	2.22	2.37	2.22	8,005.33	7,507.67
		2	3,375.00	8,000.00	7,505.00	2.37	2.22				
		3	3,375.00	8,010.00	7,512.00	2.37	2.23				
	15:5	1	3,375.00	7,969.00	7,465.00	2.36	2.21	2.36	2.22	7,974.67	7,476.00
		2	3,375.00	7,975.00	7,484.00	2.36	2.22				
		3	3,375.00	7,980.00	7,479.00	2.36	2.22				



ตารางที่ ข-9 การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง 150 นาที กำลังไฟ 900 Watts

ระยะเวลาใน การบ่ม 150 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม : ถั่วปาล์มน้ำมัน : ถั่วชานอ้อย	ก้อน ตัวอย่าง ทดสอบ	ปริมาตร ก้อนตัวอย่าง (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง ก่อนอบ (g)	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง หลังอบ (g)	ความ หนาแน่น ก่อนตัวอย่าง ก่อนอบ (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น หลังอบ (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น ก่อนอบเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น หลังอบเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง ก่อนอบเฉลี่ย (g)	น้ำหนักก้อน ตัวอย่าง หลังอบเฉลี่ย (g)
900	5:15	1	3,375.00	7,791.00	7,204.00	2.31	2.13	2.31	2.14	7,791.00	7,207.00
		2	3,375.00	7,800.00	7,222.00	2.31	2.14				
		3	3,375.00	7,782.00	7,195.00	2.31	2.13				
	10:10	1	3,375.00	7,876.00	7,275.00	2.33	2.16	2.34	2.16	7,884.00	7,283.00
		2	3,375.00	7,883.00	7,284.00	2.34	2.16				
		3	3,375.00	7,893.00	7,290.00	2.34	2.16				
	15:5	1	3,375.00	7,800.00	7,210.00	2.31	2.14	2.33	2.16	7,863.33	7,275.33
		2	3,375.00	7,890.00	7,297.00	2.34	2.16				
		3	3,375.00	7,900.00	7,319.00	2.34	2.17				

ตารางที่ ข-10 การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง 28 วัน

ระยะเวลาในการบ่ม	อัตราส่วนผสม : เถ้าขานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ	ปริมาตรก้อนตัวอย่าง (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนักก้อนก่อนอบ (g)	น้ำหนักก้อนหลังอบ (g)	ความหนาแน่นก้อนตัวอย่างก่อนอบ (g/cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่นก้อนตัวอย่างหลังอบ (g/cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่นก้อนตัวอย่างก่อนอบเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่นก้อนตัวอย่างหลังอบเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	น้ำหนักก้อนก่อนอบเฉลี่ย (g)	น้ำหนักก้อนหลังอบเฉลี่ย (g)
28	5:15	1	3,375.00	8,150.00	7,893.00	2.41	2.34	2.41	2.34	8,140.00	7,883.00
		2	3,375.00	8,140.00	7,870.00	2.41	2.33				
		3	3,375.00	8,130.00	7,886.00	2.41	2.34				
	10:10	1	3,375.00	8,000.00	7,743.00	2.37	2.29	2.39	2.32	8,060.00	7,838.67
		2	3,375.00	8,120.00	7,875.00	2.41	2.33				
		3	3,375.00	8,060.00	7,898.00	2.39	2.34				
	15:5	1	3,375.00	8,040.00	7,893.00	2.38	2.34	2.39	2.34	8,050.00	7,885.67
		2	3,375.00	8,040.00	7,889.00	2.38	2.34				
		3	3,375.00	8,070.00	7,875.00	2.39	2.33				

ตารางที่ ข-11 ผลการทดสอบการหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างทดสอบที่เวลาต่างๆ

ระยะเวลาในการบ่ม Watts	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์ม: เถ้าขานอ้อย	ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )					
		90 นาที		120 นาที		150 นาที	
		ก่อนบ่ม	หลังบ่ม	ก่อนบ่ม	หลังบ่ม	ก่อนบ่ม	หลังบ่ม
450	5:15	2.39	2.3	2.35	2.23	2.39	2.24
	10:10	2.38	2.29	2.37	2.25	2.4	2.26
	15:5	2.36	2.27	2.37	2.25	2.37	2.22
720	5:15	2.38	2.24	2.36	2.21	2.36	2.21
	10:10	2.38	2.24	2.38	2.24	2.37	2.22
	15:5	2.39	2.25	2.36	2.22	2.36	2.22
900	5:15	2.38	2.24	2.36	2.19	2.31	2.14
	10:10	2.39	2.24	2.39	2.22	2.34	2.16
	15:5	2.4	2.25	2.35	2.18	2.33	2.16

ตารางที่ ข-12 ผลการทดสอบการหาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างทดสอบที่ 28 วัน

ระยะเวลาในการบ่ม วัน	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์ม: เถ้าขานอ้อย	ค่าความหนาแน่น ที่ 28 วัน	
		ก่อนบ่ม	หลังบ่ม
		28 วัน	5:15
	10:10	2.39	2.32
	15:5	2.39	2.34

ตารางที่ ข-13 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักก่อนและหลังบ่มของก้อนตัวอย่างด้วยไมโครเวฟ

ระยะเวลา ในการบ่ม Watts	อัตราส่วนผสม ของเถาปลาคุ้งน้ำมัน: เถาซานอ้อย	90 นาที		120 นาที		150 นาที	
		น้ำหนัก		น้ำหนัก		น้ำหนัก	
		ก่อนบ่ม	หลังบ่ม	ก่อนบ่ม	หลังบ่ม	ก่อนบ่ม	หลังบ่ม
		(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
450	5:15	8,080.00	7,746.67	7,947.33	7,535.67	8,071.00	7,576.33
	10:10	8,025.67	7,720.00	8,000.00	7,605.33	8,089.00	7,622.33
	15:5	7,952.00	7,660.67	7,996.67	7,581.33	7,982.00	7,502.33
720	5:15	8,021.67	7,559.33	7,951.00	7,457.00	7,955.67	7,459.67
	10:10	8,027.00	7,554.00	8,041.33	7,558.67	8,005.33	7,507.67
	15:5	8,064.00	7,578.33	7,969.67	7,476.67	7,974.67	7,476.00
900	5:15	8,044.33	7,546.33	7,949.67	7,384.67	7,791.00	7,207.00
	10:10	8,073.33	7,570.00	8,055.67	7,495.00	7,884.00	7,283.00
	15:5	8,101.67	7,591.67	7,928.67	7,357.00	7,863.33	7,275.33

ตารางที่ ข-14 ปริมาณความชื้นที่ระเหยหลังจากการบ่มด้วยไมโครเวฟ

ระยะเวลา ในการบ่ม Watts	อัตราส่วนผสม ของเถาปลาคุ้งน้ำมัน: เถาซานอ้อย	ปริมาณความชื้นที่ระเหยหลังอบเฉลี่ย					
		90 นาที		120 นาที		150 นาที	
		(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)
450	5:15	333.33	4.12	411.66	5.18	494.67	6.13
	10:10	305.67	3.81	394.67	4.93	466.67	5.77
	15:5	291.33	3.66	415.34	5.19	479.67	6.01
720	5:15	462.34	5.76	494.00	6.21	496.00	6.23
	10:10	473.00	5.89	482.66	6.00	497.66	6.23
	15:5	485.67	6.02	493.00	6.19	498.67	6.25
900	5:15	498.00	6.19	565.00	7.11	584.00	7.50
	10:10	503.33	6.23	560.67	6.96	601.00	7.62
	15:5	510.00	6.29	571.67	7.21	588.00	7.48

ตารางที่ ข-15 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักก่อนและหลังบ่มของก้อนตัวอย่างทดสอบที่ 28 วัน

ระยะเวลา ในการบ่ม วัน	อัตราส่วนผสม ของเถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าชานอ้อย	28 วัน		ปริมาณความชื้นที่ระเหย	
		ก่อนบ่ม	หลังบ่ม	28 วัน	
		(g)	(g)	(g)	(%)
28 วัน	5:15	8,140.00	7,883.00	257.00	3.16
	10:10	8,060.00	7,838.67	221.33	2.75
	15:5	8,050.00	7,885.67	164.33	2.04

ตารางที่ ข-16 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของก้อนตัวอย่างทดสอบที่ระยะเวลาในการบ่ม  
ต่างๆ กัน

ระยะเวลา ในการบ่ม Watts	อัตราส่วนผสม ของเถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าชานอ้อย	กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ย (ksc)		
		90 นาที	120 นาที	150 นาที
450	5:15	230.11	235.39	259.19
	10:10	221.56	223.9	255.37
	15:5	208.06	210.97	282.27
720	5:15	285.92	336.12	291.1
	10:10	221.91	263.72	236.43
	15:5	294.73	338.1	252.44
900	5:15	280.12	280.67	233.43
	10:10	252.8	243.29	224.26
	15:5	308.2	290.15	259.98

ตารางที่ ข-17 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของก้อนตัวอย่างทดสอบที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน

ระยะเวลาในการบ่มวัน	อัตราส่วนผสมของเถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าขานอ้อย	กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ย (ksc)
28 วัน	5:15	463.68
	10:10	450.97
	15:5	487.64

ตารางที่ ข-18 ผลการทดสอบการหาค่าปริมาณการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่างทดสอบที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ

ระยะเวลาในการบ่ม Watts	อัตราส่วนผสมของเถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าขานอ้อย	อัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ย (%)		
		90 นาที	120 นาที	150 นาที
450	5:15	4.12	4.3	6.81
	10:10	4.02	4.16	6.27
	15:5	3.42	4.46	6.53
720	5:15	6.11	6.21	9.03
	10:10	6.12	6.15	9.18
	15:5	6.22	6.19	9.19
900	5:15	6.23	7.37	9.34
	10:10	6.35	6.99	9.83
	15:5	6.52	7.44	10.06

ตารางที่ ข-19 ผลการทดสอบการหาค่าปริมาณการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่างทดสอบที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

ระยะเวลาในการบ่มวัน	อัตราส่วนผสมของเถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าชานอ้อย	อัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ย (%)
28 วัน	5:15	3.39
	10:10	3.3
	15:5	3.61



**Project Name :** การทดสอบกำลังต้านทานรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่ทำการบ่มด้วยไมโครเวฟที่กำลังวัตต์และระยะเวลาต่างๆ

**Location :** RMUTR/KKW.

**Checked by :** อาจารย์ทวิศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวิกุล

**Test by :** นางสาวกนกกาญจน์ ทองขี้ม

: นางสาวสุคันธา รัตน์ะ

: นายสุธี แสงนคร

**ตารางที่ ค-1** แสดงผลการทดสอบก้อนตัวอย่างการบ่มที่ระยะเวลา 90 นาที กำลังไฟ 450 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 90 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าขานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ ( 15x15x15 ) ( cm )	แรงอัดที่ทำให้ ขึ้นทดสอบวิบัติ (KN)	พื้นที่หน้าตัด รับแรงอัด ( cm <sup>2</sup> )	กำลังต้านทาน แรงอัด ( ksc )	กำลังต้านทาน แรงอัดเฉลี่ย (ksc)
450	5:15	1	528.60	225.00	239.48	230.11
		2	514.30	225.00	233.00	
		3	480.80	225.00	217.83	
	10:10	1	489.80	225.00	221.91	221.56
		2	523.70	225.00	237.26	
		3	453.60	225.00	205.50	
	15:5	1	430.00	225.00	194.81	208.06
		2	497.40	225.00	225.35	
		3	450.30	225.00	204.01	



ตารางที่ ค-2 แสดงผลการทดสอบก้อนตัวอย่างการบ่มที่ระยะเวลา 90 นาที กำลังไฟ 720 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 90 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าชานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ ( 15x15x15) ( cm)	แรงอัดที่ทำให้ ขึ้นทดสอบวิบัติ (KN)	พื้นที่หน้าตัด รับแรงอัด ( cm <sup>2</sup> )	กำลังต้านทาน แรงอัด ( ksc )	กำลังต้านทาน แรงอัดเฉลี่ย (ksc)
720	5:15	1	639.80	225.00	289.86	285.92
		2	638.90	225.00	289.46	
		3	614.60	225.00	278.45	
	10:10	1	519.80	225.00	235.50	221.91
		2	483.90	225.00	219.23	
		3	465.70	225.00	210.99	
	15:5	1	610.50	225.00	276.59	294.73
		2	643.20	225.00	291.40	
		3	697.90	225.00	316.19	

ตารางที่ ค-3 แสดงผลการทดสอบก้อนตัวอย่างการบ่มที่ระยะเวลา 90 นาที กำลังไฟ 900 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 90 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าขานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ ( 15x15x15) ( cm)	แรงอัดที่ทำให้ ขึ้นทดสอบวิบัติ (KN)	พื้นที่หน้าตัด รับแรงอัด ( cm <sup>2</sup> )	กำลังต้านทาน แรงอัด ( ksc )	กำลังต้านทาน แรงอัดเฉลี่ย (ksc)
900	5:15	1	596.80	225.00	270.38	280.12
		2	650.10	225.00	294.53	
		3	608.00	225.00	275.46	
	10:10	1	568.00	225.00	257.33	252.80
		2	554.00	225.00	250.99	
		3	552.00	225.00	250.08	
	15:5	1	651.80	225.00	295.30	308.20
		2	710.00	225.00	321.67	
		3	679.00	225.00	307.62	

ตารางที่ ค-4 แสดงผลการทดสอบก้อนตัวอย่างการบ่มที่ระยะเวลา 120 นาที กำลังไฟ 450 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 120 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าขานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ ( 15x15x15 ) ( cm )	แรงอัดที่ทำให้ ขึ้นทดสอบวิบัติ (KN)	พื้นที่หน้าตัด รับแรงอัด ( cm <sup>2</sup> )	กำลังต้านทาน แรงอัด ( ksc )	กำลังต้านทาน แรงอัดเฉลี่ย (ksc)
450	5:15	1	531.80	225.00	240.93	235.39
		2	516.60	225.00	234.05	
		3	510.30	225.00	231.19	
	10:10	1	448.00	225.00	202.97	223.90
		2	493.00	225.00	223.35	
		3	541.60	225.00	245.37	
	15:5	1	453.80	225.00	205.60	210.97
		2	483.20	225.00	218.91	
		3	460.00	225.00	208.40	

ตารางที่ ค-5 แสดงผลการทดสอบก้อนตัวอย่างการบ่มที่ระยะเวลา 120 นาที กำลังไฟ 720 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 120 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าขานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ ( 15x15x15 ) ( cm )	แรงอัดที่ทำให้ ขึ้นทดสอบวิบัติ (KN)	พื้นที่หน้าตัด รับแรงอัด ( cm <sup>2</sup> )	กำลังต้านทาน แรงอัด ( ksc )	กำลังต้านทาน แรงอัดเฉลี่ย (ksc)
720	5:15	1	760.70	225.00	344.64	336.12
		2	744.70	225.00	337.39	
		3	720.30	225.00	326.33	
	10:10	1	572.30	225.00	259.28	263.72
		2	580.80	225.00	263.13	
		3	593.20	225.00	268.75	
	15:5	1	762.20	225.00	345.32	338.10
		2	745.10	225.00	337.57	
		3	731.50	225.00	331.41	

ตารางที่ ค-6 แสดงผลการทดสอบก้อนตัวอย่างการบ่มที่ระยะเวลา 120 นาที กำลังไฟ 900 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 120 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าขานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ ( 15x15x15 ) ( cm )	แรงอัดที่ทำให้ ขึ้นทดสอบวิบัติ (KN)	พื้นที่หน้าตัด รับแรงอัด ( cm <sup>2</sup> )	กำลังต้านทาน แรงอัด ( ksc )	กำลังต้านทาน แรงอัดเฉลี่ย (ksc)
900	5:15	1	647.00	225.00	293.12	280.67
		2	621.30	225.00	281.48	
		3	590.20	225.00	267.39	
	10:10	1	534.00	225.00	241.93	243.29
		2	548.00	225.00	248.27	
		3	529.00	225.00	239.66	
	15:5	1	650.00	225.00	294.48	290.15
		2	642.00	225.00	290.86	
		3	629.30	225.00	285.11	

ตารางที่ ค-7 แสดงผลการทดสอบก้อนตัวอย่างการบ่มที่ระยะเวลา 150 นาที กำลังไฟ 450 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 150 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าชานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ ( 15x15x15 ) ( cm )	แรงอัดที่ทำให้ ขึ้นทดสอบวิบัติ (KN)	พื้นที่หน้าตัด รับแรงอัด ( cm <sup>2</sup> )	กำลังต้านทาน แรงอัด ( ksc )	กำลังต้านทาน แรงอัดเฉลี่ย (ksc)
450	5:15	1	573.00	225.00	259.60	259.19
		2	561.20	225.00	254.25	
		3	582.10	225.00	263.72	
	10:10	1	557.00	225.00	252.35	255.37
		2	571.00	225.00	258.69	
		3	563.00	225.00	255.07	
	15:5	1	614.10	225.00	278.22	282.27
		2	631.20	225.00	285.97	
		3	623.80	225.00	282.61	

ตารางที่ ค-8 แสดงผลการทดสอบก้อนตัวอย่างการบ่มที่ระยะเวลา 150 นาที กำลังไฟ 720 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 150 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน : เถ้าขานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ ( 15x15x15) ( cm)	แรงอัดที่ทำให้ ชั้นทดสอบวิบัติ (KN)	พื้นที่หน้าตัด รับแรงอัด ( cm <sup>2</sup> )	กำลังต้านทาน แรงอัด ( ksc )	กำลังต้านทาน แรงอัดเฉลี่ย (ksc)
720	5:15	1	625.30	225.00	283.29	291.10
		2	648.50	225.00	293.80	
		3	653.80	225.00	296.21	
	10:10	1	501.30	225.00	227.12	236.43
		2	521.10	225.00	236.09	
		3	543.20	225.00	246.10	
	15:5	1	542.20	225.00	245.65	252.44
		2	571.30	225.00	258.83	
		3	558.10	225.00	252.85	

ตารางที่ ค-9 แสดงผลการทดสอบก้อนตัวอย่างการบ่มที่ระยะเวลา 150 นาที กำลังไฟ 900 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 150 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าขานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ ( 15x15x15) ( cm)	แรงอัดที่ทำให้ ขึ้นทดสอบวิบัติ (KN)	พื้นที่หน้าตัด รับแรงอัด ( cm <sup>2</sup> )	กำลังต้านทาน แรงอัด ( ksc )	กำลังต้านทาน แรงอัดเฉลี่ย (ksc)
900	5:15	1	501.70	225.00	227.30	233.43
		2	529.00	225.00	239.66	
		3	515.00	225.00	233.32	
	10:10	1	487.00	225.00	220.64	224.26
		2	496.00	225.00	224.71	
		3	502.00	225.00	227.43	
	15:5	1	572.90	225.00	259.55	259.98
		2	568.80	225.00	257.70	
		3	579.80	225.00	262.68	



ตารางที่ ค-10 แสดงผลการทดสอบก้อนตัวอย่างการบ่มที่ระยะเวลา 28 วัน

ระยะเวลาในการบ่ม วัน	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าขานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ ( 15x15x15 ) ( cm )	แรงอัดที่ทำให้ ชิ้นทดสอบวิบัติ (KN)	พื้นที่หน้าตัด รับแรงอัด ( cm <sup>2</sup> )	กำลังต้านทาน แรงอัด ( ksc )	กำลังต้านทาน แรงอัดเฉลี่ย (ksc)
28	5:15	1	1,006.00	225.00	455.77	463.68
		2	1,043.00	225.00	472.53	
		3	1,021.40	225.00	462.75	
	10:10	1	987.80	225.00	447.53	450.97
		2	995.30	225.00	450.92	
		3	1,003.10	225.00	454.46	
	15:5	1	1,108.00	225.00	501.98	487.64
		2	1,089.00	225.00	493.37	
		3	1,032.00	225.00	467.55	

**Project Name:** การทดสอบหาค่าปริมาณการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่างที่ทำการบ่มด้วยไมโครเวฟที่กำลังวัตต์และระยะเวลาต่างๆ

**Location** : RMUTR/KKW.

**Checked by** : อาจารย์ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล

**Test by** : นางสาวกนกกาญจน์ ทองซิม

: นางสาวสุคันธา รัตน์ะ

: นายสุธี แสงนคร

**ตารางที่ ง-1** ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลา 90 นาทีกำลังไฟ 450 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 90 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าขานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ (15x15x15) (cm)	ปริมาตรก้อน ตัวอย่างวิบัติ (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก ที่อบแห้ง (g)	น้ำหนัก ที่ดูดซึมน้ำ (g)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำ (%)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำเฉลี่ย (%)
450	5:15	1	3,375.00	7,540.00	7,832.00	3.87	4.12
		2	3,375.00	7,620.00	7,931.00	4.08	
		3	3,375.00	7,780.00	8,123.00	4.41	
	10:10	1	3,375.00	7,595.00	7,898.00	3.99	4.02
		2	3,375.00	7,610.00	7,913.00	3.98	
		3	3,375.00	7,543.00	7,851.00	4.08	
	15:5	1	3,375.00	7,756.00	7,993.00	3.06	3.42
		2	3,375.00	7,539.00	7,812.00	3.62	
		3	3,375.00	7,658.00	7,932.00	3.58	

ตารางที่ ง-2 ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลา 90 นาทีกำลังไฟ 720 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 90 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าขานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ ( 15x15x15 ) ( cm )	ปริมาตรก้อน ตัวอย่างวิบัติ ( cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก ที่อบแห้ง ( g )	น้ำหนัก ที่ดูดซึมน้ำ ( g )	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำ ( % )	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำเฉลี่ย ( % )	
720	5:15	1	3,375.00	7,424.00	7,878.00	6.12	6.11	
		2	3,375.00	7,543.00	7,986.00	5.87		
		3	3,375.00	7,582.00	8,062.00	6.33		
	10:10	1	3,375.00	3,375.00	7,612.00	8,100.00	6.41	6.12
		2	3,375.00	3,375.00	7,545.00	8,002.00	6.06	
		3	3,375.00	3,375.00	7,483.00	7,923.00	5.88	
	15:5	1	3,375.00	3,375.00	7,534.00	8,002.00	6.21	6.22
		2	3,375.00	3,375.00	7,683.00	8,197.00	6.69	
		3	3,375.00	3,375.00	7,576.00	8,013.00	5.77	

ตารางที่ ง-3 ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลา 90 นาทีกำลังไฟ 900 Watts

ระยะเวลาในการต้ม 90 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าชานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ ( 15x15x15) ( cm)	ปริมาตรก้อน ตัวอย่างวิบัติ (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก ที่อบแห้ง ( g)	น้ำหนัก ที่ดูดซึมน้ำ ( g )	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำ (%)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำเฉลี่ย (%)
900	5:15	1	3,375.00	7,543.00	8,012.00	6.22	6.23
		2	3,375.00	7,573.00	8,043.00	6.21	
		3	3,375.00	7,453.00	7,920.00	6.27	
	10:10	1	3,375.00	7,502.00	7,987.00	6.46	6.35
		2	3,375.00	7,693.00	8,176.00	6.28	
		3	3,375.00	7,543.00	8,018.00	6.30	
	15:5	1	3,375.00	7,404.00	7,893.00	6.60	6.52
		2	3,375.00	7,532.00	8,012.00	6.37	
		3	3,375.00	7,548.00	8,045.00	6.58	

ตารางที่ ง-4 ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลา 120 นาทีกำลังไฟ 450 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 120 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าขานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ ( 15x15x15) ( cm)	ปริมาตรก้อน ตัวอย่างวิบัติ (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก ที่อบแห้ง ( g)	น้ำหนัก ที่ดูดซึมน้ำ ( g )	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำ (%)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำเฉลี่ย (%)
450	5:15	1	3,375.00	7,525.00	7,854.00	4.37	4.30
		2	3,375.00	7,501.00	7,823.00	4.29	
		3	3,375.00	7,581.00	7,901.00	4.22	
	10:10	1	3,375.00	7,487.00	7,785.00	3.98	4.16
		2	3,375.00	7,503.00	7,821.00	4.24	
		3	3,375.00	7,534.00	7,854.00	4.25	
	15:5	1	3,375.00	7,544.00	7,879.00	4.44	4.46
		2	3,375.00	7,655.00	7,986.00	4.32	
		3	3,375.00	7,604.00	7,954.00	4.60	

ตารางที่ ง-5 ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลา 120 นาทีกำลังไฟ 720 Watts

ระยะเวลาในการต้ม 120 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าขานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ ( 15x15x15 ) ( cm )	ปริมาตรก้อน ตัวอย่างวิบัติ ( cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก ที่อบแห้ง ( g )	น้ำหนัก ที่ดูดซึมน้ำ ( g )	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำ ( % )	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำเฉลี่ย ( % )
720	5:15	1	3,375.00	7,443.00	7,923.00	6.45	6.21
		2	3,375.00	7,519.00	7,989.00	6.25	
		3	3,375.00	7,456.00	7,899.00	5.94	
	10:10	1	3,375.00	7,294.00	7,708.00	5.68	6.15
		2	3,375.00	7,552.00	8,054.00	6.65	
		3	3,375.00	7,505.00	7,965.00	6.13	
	15:5	1	3,375.00	7,564.00	8,032.00	6.19	6.19
		2	3,375.00	7,400.00	7,853.00	6.12	
		3	3,375.00	7,512.00	7,983.00	6.27	

ตารางที่ ง-6 ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลา120 นาทีกำลังไฟ 900 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 120 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าขานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ ( 15x15x15) ( cm)	ปริมาตรก้อน ตัวอย่างวิบัติ (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก ที่อบแห้ง ( g)	น้ำหนัก ที่ดูดซึมน้ำ ( g )	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำ (%)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำเฉลี่ย (%)
900	5:15	1	3,375.00	7,400.00	7,972.00	7.73	7.37
		2	3,375.00	7,433.00	7,963.00	7.13	
		3	3,375.00	7,397.00	7,934.00	7.26	
	10:10	1	3,375.00	7,486.00	8,001.00	6.88	6.99
		2	3,375.00	7,471.00	8,006.00	7.16	
		3	3,375.00	7,532.00	8,054.00	6.93	
	15:5	1	3,375.00	7,373.00	7,912.00	7.31	7.44
		2	3,375.00	7,348.00	7,909.00	7.63	
		3	3,375.00	7,354.00	7,896.00	7.37	

ตารางที่ ง-7 ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลา150 นาทีกำลังไฟ 450 Watts

ระยะเวลาในการต้ม 150 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าชานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ ( 15x15x15) ( cm)	ปริมาตรก้อน ตัวอย่างวิบัติ (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก ที่อบแห้ง ( g)	น้ำหนัก ที่ดูดซึมน้ำ ( g )	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำ (%)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำเฉลี่ย (%)
450	5:15	1	3,375.00	7,490.00	7,949.00	6.13	6.81
		2	3,375.00	7,512.00	8,009.00	6.62	
		3	3,375.00	7,525.00	8,103.00	7.68	
	10:10	1	3,375.00	7,435.00	7,901.00	6.27	6.27
		2	3,375.00	7,439.00	7,906.00	6.28	
		3	3,375.00	7,543.00	8,015.00	6.26	
	15:5	1	3,375.00	7,435.00	7,907.00	6.35	6.53
		2	3,375.00	7,498.00	7,987.00	6.52	
		3	3,375.00	7,507.00	8,012.00	6.73	



ตารางที่ ง-8 ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลา 150 นาทีกำลังไฟ 720 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 150 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าชานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ ( 15x15x15 ) ( cm )	ปริมาตรก้อน ตัวอย่างวิบัติ (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก ที่อบแห้ง ( g )	น้ำหนัก ที่ดูดซึมน้ำ ( g )	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำ (%)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำเฉลี่ย (%)
720	5:15	1	3,375.00	7,276.00	7,947.00	9.22	9.03
		2	3,375.00	7,309.00	7,965.00	8.98	
		3	3,375.00	7,268.00	7,914.00	8.89	
	10:10	1	3,375.00	7,345.00	8,006.00	9.00	9.18
		2	3,375.00	7,345.00	8,010.00	9.05	
		3	3,375.00	7,321.00	8,016.00	9.49	
	15:5	1	3,375.00	7,171.00	7,806.00	8.86	9.19
		2	3,375.00	7,209.00	7,876.00	9.25	
		3	3,375.00	7,127.00	7,801.00	9.46	

ตารางที่ ง-9 ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลา 150 นาทีกำลังไฟ 900 Watts

ระยะเวลาในการบ่ม 150 นาที/Watts	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าชานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ ( 15x15x15 ) ( cm )	ปริมาตรก้อน ตัวอย่างวิบัติ ( cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก ที่อบแห้ง ( g )	น้ำหนัก ที่ดูดซึมน้ำ ( g )	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำ ( % )	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำเฉลี่ย ( % )	
900	5:15	1	3,375.00	7,240.00	7,899.00	9.10	9.34	
		2	3,375.00	7,253.00	7,906.00	9.00		
		3	3,375.00	7,201.00	7,916.00	9.93		
	10:10	1	3,375.00	3,375.00	7,389.00	8,101.00	9.64	9.83
		2	3,375.00	3,375.00	7,304.00	8,037.00	10.04	
		3	3,375.00	3,375.00	7,293.00	8,009.00	9.82	
	15:5	1	3,375.00	3,375.00	7,216.00	7,923.00	9.80	10.06
		2	3,375.00	3,375.00	7,288.00	7,995.00	9.70	
		3	3,375.00	3,375.00	7,295.00	8,074.00	10.68	

ตารางที่ ง-10 ผลการทดสอบการหาปริมาณการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกำลังสูงด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลา 28 วัน

ระยะเวลาในการบ่ม วัน	อัตราส่วนผสม เถ้าปาล์มน้ำมัน: เถ้าขานอ้อย	ก้อนตัวอย่างทดสอบ ( 15x15x15) ( cm)	ปริมาตรก้อน ตัวอย่างวิบัติ (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก ที่อบแห้ง ( g)	น้ำหนัก ที่ดูดซึมน้ำ ( g )	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำ (%)	เปอร์เซ็นต์ การดูดซึมน้ำเฉลี่ย (%)
28	5:15	1	3,375.00	7,891.00	8,152.00	3.31	3.39
		2	3,375.00	7,879.00	8,146.00	3.39	
		3	3,375.00	7,863.00	8,136.00	3.47	
	10:10	1	3,375.00	7,749.00	8,034.00	3.68	3.30
		2	3,375.00	7,872.00	8,124.00	3.20	
		3	3,375.00	7,891.00	8,130.00	3.03	
	15:5	1	3,375.00	7,890.00	8,143.00	3.21	3.61
		2	3,375.00	7,883.00	8,156.00	3.46	
		3	3,375.00	7,800.00	8,124.00	4.15	