



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การประยุกต์ใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมน้ำตาลสำหรับพัฒนาค่าการหน่วง
ความร้อนของวัสดุผนังอาคารเพื่อลดภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศ

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.อรรถกร ทองทา และคณะ
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยมหิดล

วันลงทะเบียน 06 ธ.ค. 2562

เลขทะเบียน 103/1735

เลขเรียกหนังสือ ๑

7P

๘๑7

.6
03475
9562

สิงหาคม 2562

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การประยุกต์ใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมน้ำตาลสำหรับพัฒนาค่าการหน่วง
ความร้อนของวัสดุผนังอาคารเพื่อลดภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศ

คณะผู้วิจัย

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถกร ทองทา ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย มณีวรรณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สังกัด

สนับสนุนโดย

งบประมาณแผ่นดิน (แบบปกติ)

ปีงบประมาณ 2562

สารบัญ

	หน้า
Executive Summary	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ✓	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย ✓	2
ขอบเขตการวิจัย ✓	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ✓	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	23
วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	23
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	23
วิธีเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ	23
การเตรียมคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อยขนาด 7 cm x 7 cm	25
การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อยขนาด 7.5 cm x 20 cm x 60 cm เพื่อนำไปทดสอบค่าการหน่วงความร้อน	26
การออกแบบอิฐมวลเบาหลุมรูปทรงกรวยเพื่อบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ	27
เตรียมห้องทดสอบและการทดสอบประสิทธิภาพของอิฐในเงื่อนไขต่างๆ	28
หาเงื่อนไขที่เหมาะสมของอิฐมวลเบาที่นำมาใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ	30
ทดสอบในสภาพอากาศจริง	30

โดยคุณ
 สรรพวุฒิ
 สรรพวุฒิ
 สรรพวุฒิ

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล 32

 ผลการทดลองสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาที่มีการแทนที่
 ปูนซีเมนต์ปอซแลนด์ด้วยเถ้าชานอ้อย 32

 ร้อยละการหดตัว 32

 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร 33

 ร้อยละการดูดซึมน้ำ 35

 การรับแรงอัด 36

 ผลการทดลองสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาที่มีการแทนที่ทราย
 ด้วยเถ้าชานอ้อย 37

 ร้อยละการหดตัว 37

 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร 38

 ร้อยละการดูดซึมน้ำ 39

 การรับแรงอัด 42

 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนในห้องจำลอง 44

 อิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม 44

 อิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะจำนวน 3 หลุม 46

 อิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะ 4 หลุม 48

 อิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ 49

 อุณหภูมิผนังภายนอกของอิฐมวลเบาในเงื่อนไขต่างๆ 51

 อุณหภูมิผนังภายในของอิฐมวลเบาในเงื่อนไขต่างๆ 53

 อุณหภูมิภายในห้องของอิฐมวลเบาในเงื่อนไขต่างๆ 55

 การหน่วงความร้อนในห้องสอบ 57

 ปัจจัยการลดลง (Decrement factor) 58

 ผลการทดลองสมบัติทางความร้อนในสภาพแวดล้อมจริง 59

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย 67

 สรุปผลการวิจัย 67

 บรรณานุกรม 69

 ภาคผนวก 76

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ชนิดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา	4
2.2	ความต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา	5
2.3	อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกมวลเบา	5
3.1	ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในห้องทดสอบ	30
3.2	ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในห้องทดสอบในสภาพอากาศจริง	31
4.1	ร้อยละการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนประกอบของเถ้าขาน้อยที่สุดใน สัดส่วนต่างๆ	33
4.2	ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าขาน้อยใน สัดส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาการทดสอบที่ต่างกัน	34
4.3	ร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าขาน้อยในสัดส่วน ต่างๆ ที่ระยะเวลาการทดสอบที่ต่างกัน	36
4.4	การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาในสัดส่วนต่างๆ	38
4.5	ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาในอัตราส่วนต่างๆ	40
4.6	การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาในอัตราส่วนต่างๆ	41
4.7	ค่าการรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าขาน้อยในสัดส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาการทดสอบที่ต่างกัน	42
4.8	ค่าการรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาในสัดส่วนต่างๆ	43
4.9	อุณหภูมิเฉลี่ยความหนาของอิฐมวลเบาในห้องทดสอบ	51
4.10	ผลการทดลองอุณหภูมิภายในห้องทดลอง	57
4.11	ค่าหน่วงเวลา (Time lag)	57
4.12	ปัจจัยการลดลง (Decrement factor)	58
4.13	การหน่วงความร้อนในห้องสอบในสภาพอากาศจริง	66
4.14	แสดงปัจจัยการลดลง (Decrement factor) ในสภาพอากาศจริง	66

สารบัญรูป

รูป		หน้า
2.1	การนำความร้อนเข้าสู่ภายในตัวบ้าน	6
2.2	ปัจจัยพื้นฐานในการพิจารณาเพื่อให้เกิดสภาวะความสบายแก่อาคาร	10
2.3	ระดับความเป็นอนวนกับค่าความต้านทานความร้อน	12
2.4	ลักษณะแรงดันต่อการแตลด้านข้าง (Confining stress)	15
2.5	การทดสอบแรงดัด	17
2.6	ความพรุน (ก) ทรงกลมมีความพรุน 27 % (ข) ทรงกลมจัดเรียงตัวหลวมมีความพรุน 47 % (ค) คัดขนาดไม่ดีความพรุนต่ำ (ง) คัดขนาดดีความพรุนสูง	19
3.1	แม่พิมพ์ ขนาด 7 cm x 7 cm x 7 cm	25
3.2	การผสมตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา	25
3.3	การตกแต่งผิวหน้าคอนกรีต	26
3.4	การตกแต่งผิวหน้าคอนกรีต	26
3.5	เจาะอิฐมวลเบารูปทรงกรวยจำนวน 2 หลุม 3 หลุม และ 4 หลุม	27
3.6	อิฐมวลเบาที่ห่อหุ้มด้วยสารห่อหุ้มสารเปลี่ยนสถานะ	28
3.7	ฉาบปูนบริเวณสารเปลี่ยนสารสถานะ	28
3.8	แผนภาพแสดงชุดการทดลองและอุปกรณ์ การทดสอบเพื่อตรวจสอบค่าการหน่วงเวลา (Time lag) และ ปัจจัยการลดลง (Decrement factor)	29
3.9	ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิเพื่อทดสอบค่าการหน่วงเวลา (Time lag) และ ปัจจัยการลดลง (Decrement factor)	29
3.10	แผนภาพห้องทดสอบและติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิล	31
4.1	ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของคอนกรีตมวลเบาที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเถ้าขานอ้อยในสัดส่วนต่างๆ	34
4.2	ร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าขานอ้อยในสัดส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาการทดสอบที่ต่างกัน	35
4.3	การรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าขานอ้อยในสัดส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาการทดสอบที่ต่างกัน	37
4.4	ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ระยะเวลา 7 14 28 และ 60 วัน	39
4.5	ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตเบาที่ผสมเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนต่างๆ ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ระยะเวลา 7 14 28 และ 60 วัน	41
4.6	ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลา 7 14 28 และ 60 วัน	43
4.7	อิฐมวลเบาที่มี PCM 2 หลุม ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 40°C	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
4.8	อิฐมวลเบาที่มี PCM 2 หลุม ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 50°C	45
4.9	อิฐมวลเบาที่มี PCM 2 หลุม ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 60°C	45
4.10	อิฐมวลเบาที่มี PCM 3 หลุม ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 40°C	47
4.11	อิฐมวลเบาที่มี PCM 3 หลุม ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 50°C	47
4.12	อิฐมวลเบาที่มี PCM 3 หลุม ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 60°C	47
4.13	อิฐมวลเบาที่มี PCM 4 หลุม ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 40°C	48
4.14	อิฐมวลเบาที่มี PCM 4 หลุม ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 50°C	49
4.15	อิฐมวลเบาที่มี PCM 4 หลุม ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 60°C	49
4.16	อิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 40°C	50
4.17	อิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 50°C	50
4.18	อิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 60°C	51
4.19	อุณหภูมิผนังภายนอก ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 40°C	52
4.20	อุณหภูมิผนังภายนอก ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 50°C	53
4.21	อุณหภูมิผนังภายนอก ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 60°C	53
4.22	อุณหภูมิผนังภายใน ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 40°C	54
4.23	อุณหภูมิผนังภายใน ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 50°C	54
4.24	อุณหภูมิผนังภายใน ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 60°C	55
4.25	อุณหภูมิภายในห้อง ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 40°C	56
4.26	อุณหภูมิภายในห้อง ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 50°C	56
4.27	อุณหภูมิภายในห้อง ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 60°C	56
4.28	อุณหภูมิห้องทดสอบอิฐมอญ	61
4.29	อุณหภูมิห้องทดสอบอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์	62
4.30	อุณหภูมิห้องทดสอบอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม	62
4.31	อุณหภูมิผนังภายนอกห้องทดสอบประเภทต่างๆ	65
4.32	อุณหภูมิผนังภายในห้องทดสอบประเภทต่างๆ	65
4.33	อุณหภูมิห้องทดสอบประเภทต่างๆ	65

Executive Summary

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้วัสดุทางเลือกในการผลิตคอนกรีตมวลเบา เพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง โดยมีการใช้เถ้าขานอ้อยไปแทนที่วัสดุดิบตั้งต้น เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา โดยเฉพาะค่าการรับแรงอัดและสมบัติความเป็นฉนวนของคอนกรีต โดยมี การปรับปรุงสมบัติความเป็นฉนวนของคอนกรีตโดยใช้สารเปลี่ยนสถานะบรรจุในรูปทรงกรวยที่ผิวผนังด้านนอกของคอนกรีตมวลเบา

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำเถ้าขานอ้อยมาใช้เป็นส่วนประกอบของคอนกรีตมวลเบา โดยการแทนที่ปริมาตรของปูนซีเมนต์ปอซแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, และ 40 โดยน้ำหนัก และการแทนที่ปริมาตรของทราย ในสัดส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, และ 40 โดยน้ำหนัก เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล โดยมี การทดสอบสมบัติเบื้องต้น เช่น ความหนาแน่น การดูดกลืนน้ำ และการรับแรงอัด สัดส่วนอิฐมวลเบาที่เหมาะสมจะมีการออกแบบรูปทรงกรวยเพื่อใช้บรรจุสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม 3 หลุม และ 4 หลุม เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม สำหรับลดการถ่ายเทความร้อนสู่อาคาร จากการศึกษาพบว่า การทดสอบในสภาวะแวดล้อมจำลองเงื่อนไขที่มีความเหมาะสมที่สุดคือ อิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 4 หลุม สามารถลดความร้อนเข้าสู่ห้องทดสอบได้มากที่สุด และมีอุณหภูมิห้องทดสอบต่ำที่สุด 26.3°C จากนั้นทำการทดสอบในสภาวะอากาศจริงเป็น 3 วัน อิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 4 หลุม มีอุณหภูมิห้องเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 41.3°C เมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมอญ และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ ซึ่งอุณหภูมิห้องเฉลี่ย -49.4°C และ -43.3°C นอกจากนี้ อิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 4 หลุม มีค่าหน่วยความร้อนยาวนานถึง 145 นาที และปัจจัยการลดลงเท่ากับ 0.628

ดังนั้น การประยุกต์ใช้เถ้าขานอ้อยร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจะเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาเพื่อปรับปรุงสมบัติ และลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร เพื่อเป็นแนวทางเลือกสำหรับเป็นวัสดุประกอบอาคารของประเทศไทยต่อไป

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อประยุกต์ใช้วัสดุทางเลือกในการผลิตคอนกรีตมวลเบา เพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง โดยมีการใช้เถ้าซันอ้อยไปแทนที่วัสดุดิบตั้งต้น เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา โดยเฉพาะค่าการรับแรงอัดและสมบัติสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีต โดยมีการปรับปรุงสมบัติความเป็นฉนวนของคอนกรีตโดยใช้สารเปลี่ยนสถานะ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการนำเถ้าซันอ้อยมาใช้เป็นส่วนประกอบของคอนกรีตมวลเบา โดยการแทนที่ปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, และ 40 โดยน้ำหนัก และการแทนที่ปริมาณของทราย ในสัดส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, และ 40 โดยน้ำหนัก เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล โดยมีการทดสอบสมบัติเบื้องต้น เช่น ความหนาแน่น การดูดกลืนน้ำ และการรับแรงอัด สัดส่วนอิฐมวลเบาที่เหมาะสมจะมีการออกแบบรูปทรงกรวยเพื่อใช้บรรจุสารเปลี่ยนสถานะ จำนวน 2 หลุม 3 หลุม และ 4 หลุม เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม สำหรับลดการถ่ายเทความร้อนสู่อาคาร จากการศึกษาพบว่า การทดสอบในสภาวะแวดล้อมจำลองเงื่อนไขที่มีความเหมาะสมที่สุดคือ อิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 4 หลุม สามารถลดความร้อนเข้าสู่ห้องทดสอบได้มากที่สุด และมีอุณหภูมิห้องทดสอบต่ำที่สุด 26.3°C จากนั้นทำการทดสอบในสภาวะอากาศจริงเป็น 3 วัน อิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 4 หลุม มีอุณหภูมิห้องเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 41.3°C เมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมอญ และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ ซึ่งอุณหภูมิห้องเฉลี่ย 49.4°C และ 43.3°C นอกจากนี้ อิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 4 หลุม มีค่าหน่วยความร้อนยาวนานถึง 145 นาที และปัจจัยการลดลงเท่ากับ 0.628

ดังนั้น การประยุกต์ใช้เถ้าซันอ้อยร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจะเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาเพื่อปรับปรุงสมบัติ และลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร เพื่อเป็นแนวทางเลือกสำหรับเป็นวัสดุประกอบอาคารของประเทศไทยต่อไป

Abstract

The purpose of this current study was twofold. First, to include bagasse ash as a component in lightweight concrete and study the effect on the mechanical and physical properties, and thermal effectiveness, of the concrete. Subsequently, to study the thermal effectiveness and insulative properties of applying Phase Change Material (PCM) as a containing in the conical holes on the improved lightweight concrete.

This current investigation is focused on the use of bagasse ash as a component of foaming lightweight concrete by the replacement of Portland cement in the concrete mix with 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, and 40% substitution by weight and the replacement of sand in the concrete mix with 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, and 40% substitution by weight to enhance the density, water absorption and compressive strength of lightweight concrete.

The optimum lightweight concrete was further studied and improved the time lag and decrement factor. Lightweight concrete (LWC) with different conical holes for containing phase change material (PCM) was designed and prepared. Incorporating the PCM into the LWC wall with the different conical holes (2, 3 and 4 conical holes was designed to find the optimum condition for reducing heat transfer from outside wall into inside wall. It was found that LWC with PCM-contained 4 conical holes was the excellent condition that can reduce the maximum heat transfer and shows the lowest room temperature of around 26.3°C. In the case of the real ambient condition for 3 days, LWC wall with PCM-contained 4 conical holes showed the lowest room temperature was around 41.3 °C, while the room temperature of brick wall and commercial LWC was at about 49.4 °C and 43.3 °C. Furthermore, this sample can extend the time lag (145 minutes) and decrease the decrement factor (0.628) as well.

So, the applied bagasse ash and phase change material with lightweight concrete is useful for an improvement of lightweight concrete properties and reduce the heat transfer through the building wall. These compositions can be suitably considered as viable alternative material in applied concrete and masonry constructions in the future.

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาของปัญหา

ประเทศไทยมีพื้นที่ตั้งใกล้เส้นศูนย์สูตร ซึ่งมีลักษณะภูมิอากาศแบบร้อนชื้น [1] ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูงตลอดทั้งปี โดยพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยได้รับรังสีแสงอาทิตย์สูงสุดในช่วงเดือนเมษายนและพฤษภาคม มีค่าอยู่ในช่วง 20 ถึง 24 MJ/m²-day มีรังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ย 18.2 MJ/m²-day [2] ส่งผลให้มีความร้อนสะสมบริเวณกรอบอาคารค่อนข้างสูง ตลอดเกือบทั้งปีเกิดการสะสมอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นระหว่างวันส่งผลให้อุณหภูมิภายในอาคารสูงขึ้น ทำให้สภาพอากาศภายในอาคารอยู่ในสภาวะความไม่สบายเชิงความร้อน (thermal comfort) ส่งผลให้มีความต้องใช้ไฟฟ้าในระบบปรับอากาศสูง

จากปัญหาดังกล่าวทำให้เกิดแนวความคิดในการป้องกันความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ภายในอาคารและบ้านที่อยู่อาศัย เพื่อลดการส่งผ่านความร้อนเข้าสู่อาคารผ่านทางหลังคาและผนังอาคาร อาทิ เช่นการใช้ฉนวน [3-7] และแผ่นสะท้อนรังสี (Radiant barrier) มาใช้เป็นส่วนประกอบในระบบหลังคา [8-11] ส่วนผนังอาคารก็ได้มีการริเริ่มในการนำอิฐมวลเบามาใช้เป็นกรอบอาคารกันมากขึ้น [12-15] เนื่องจากมีน้ำหนักเบา มีสมบัติการนำความร้อนต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับผนังแบบอื่นๆ รวมถึงมีการพัฒนาระบบหลังคาและผนังที่เรียกว่า หลังคา์รับรังสีอาทิตย์ (Roof solar collector) [16-21] และผนังที่ลดการสะสมความร้อน (Modify trombe wall) เป็นผนังของตัวบ้านและอาคาร [22-26] แต่อย่างไรก็ตามการใช้หลักการดังกล่าวมีความยุ่งยากในการก่อสร้างและมีต้นทุนค่อนข้างสูง จึงทำให้นักวิจัยหลายๆท่านพยายามหาแนวทางอื่นๆเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยมีความพยายามที่จะพัฒนาการต้านทานความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำผนังอาคาร เพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภายในบ้านและอาคาร ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้

สำหรับในประเทศไทย อิฐมวลเบาได้รับความสนใจในการนำไปใช้งานก่อสร้างอย่างมาก ทำให้เจริญเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งในอาคารภาครัฐและเอกชน คอนโดมิเนียม และบ้านพักอาศัย ตลอดจนทำให้มียอดการจำหน่ายในประเทศไทยสูงถึงประมาณ 28,400,000 ตารางเมตร ในปี พ.ศ. 2557 ซึ่งก็เป็นผลมาจากการที่อิฐมวลเบา มีคุณสมบัติโดดเด่นที่น่าสนใจ ไม่ว่าจะเป็นในเรื่องน้ำหนักที่เบาเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีช่องว่างหรือรูพรุนที่สูงประมาณร้อยละ 80 ของปริมาตรทั้งหมด มีค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ต่ำกว่าอิฐเชิงพาณิชย์อื่นๆ มีความสามารถในการป้องกันความร้อนไหลผ่านในวัสดุได้สูง มีการหดตัวต่ำ ที่สำคัญในกระบวนการก่อสร้างผนังอาคารยังมีความง่าย สะดวก และเร็วกว่าคอนกรีตแบบอื่นๆ [27-30] ยิ่งไปกว่านั้นยังการใช้อิฐมวลเบาเป็นวัสดุประกอบผนังอาคารสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้า ที่เกิดจากการใช้พลังงานกับระบบทำความเย็นเพื่อระบายความร้อนให้เกิดสภาวะความสบายให้กับผู้อยู่อาศัย โดยไม่ต้องมีการติดตั้งวัสดุฉนวนกันความร้อน [31]

ขณะเดียวกัน ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกผลิตภัณฑ์น้ำตาลเป็นอันดับสามของโลก [32] ในระหว่างกระบวนการผลิตน้ำตาล จะมีผลิตภัณฑ์ขานอ้อยเกิดขึ้นประมาณร้อยละ 26 ของน้ำหนักอ้อย หรือมีขานอ้อยประมาณ 19 ล้านตันต่อปี และขานอ้อยที่ผลิตได้ส่วนใหญ่จะนำไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้า หลังจากกระบวนการผลิตไฟฟ้า จะเกิดของเสีย คือ เถ้าขานอ้อยขึ้น ในปริมาณร้อยละ 0.62 ของน้ำหนักอ้อย หรือประมาณ 4.5 แสนตันต่อปี [33] โดยเถ้าขานอ้อยส่วนใหญ่จะถูกนำไปทิ้ง และมีบางส่วนนำเถ้าขานอ้อยไปทำปุ๋ย หรือปรับสภาพดินที่เป็นกรด และในปัจจุบันปริมาณของเถ้าขานอ้อยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมากในแต่ละปี ซึ่งจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและที่สำคัญเถ้าขานอ้อยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุพอลิซิลานและสามารถใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้ [34-35]

จากการศึกษาข้างต้นนี้ งานวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิดในการนำเถ้าขานอ้อยมาเป็นส่วนผสมในอิฐมวลเบา เพื่อพัฒนาสมบัติต่างๆของอิฐมวลเบา จึงศึกษาตั้งแต่สมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกลของอิฐมวลเบาให้อยู่ตามเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.1505-2541) และศึกษาต่อยอดถึงขั้นตอนการใช้งานจริงกับอาคารเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภายในตัวบ้านและอาคาร โดยพิจารณาจากการคำนวณหาความร้อนของวัสดุผนังอาคารที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อการประหยัดพลังงานและค่าไฟฟ้าที่ใช้ในระบบเครื่องปรับอากาศของผู้อยู่อาศัยในบ้านได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. พัฒนาค่าการนำความร้อนของระบบผนังอาคาร เพื่อลดการส่งผ่านความร้อนเข้าสู่อาคาร
2. ศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิค เพื่อพัฒนาระบบผนังอาคารโดยการใช้เถ้าขานอ้อยมาเป็นส่วนผสมและใช้สารเปลี่ยนสถานะร่วม

ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ
2. เตรียมอิฐมวลเบาที่ผ่านตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบา
3. ศึกษาการประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะร่วมกับอิฐมวลเบา
4. ศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของอิฐมวลเบาพาณิชย์และอิฐมวลเบาที่ทำการปรับปรุง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ลดการส่งผ่านความร้อนเข้าสู่อาคาร เพื่อช่วยลดภาระการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ
2. พัฒนาระบบผนังอาคารโดยการประยุกต์ใช้เถ้าขานอ้อยและสารเปลี่ยนสถานะ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

อิฐมวลเบา [36] เป็นวัสดุที่มีมีการนำมาใช้ และเป็นที่ยอมรับมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากมีคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนได้มากกว่าวัสดุชนิดอื่นที่มีมาโดยตัววัสดุเองมีส่วนผสมมาจาก ทราย ซีเมนต์ ปูนขาว น้ำ ยิปซัม และผงอลูมิเนียมผสมรวมกัน แต่ส่วนที่สำคัญที่สุดก็คือฟองอากาศเล็กๆ เป็นรูพรุนไม่ต่อเนื่อง (Disconnecting Voids) ที่อยู่ในเนื้อวัสดุประมาณ 75% ทำให้น้ำหนักเบา ซึ่งผลของความเบาจะช่วยให้ประหยัดโครงสร้าง อีกทั้งฟองอากาศเหล่านั้นยังเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี เป็นสมบัติเฉพาะของอิฐมวลเบา

อิฐมวลเบาสามารถผลิตได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. ระบบที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (Non-Autoclaved System) ซึ่งจะแบ่งย่อยออกได้อีกเป็น 2 ประเภท คือ

ประเภทที่ 1 ใช้วัสดุเบาเข้ามาทดแทน เช่น ซีลี้อย ชานอ้อย หรือเม็ดโฟมทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักที่เบาขึ้น แต่จะมีอายุการใช้งานที่สั้นเสื่อมสภาพได้เร็ว และหากเกิดไฟไหม้สารเหล่านี้อาจเป็นพิษต่อผู้อยู่อาศัย

ประเภทที่ 2 ใช้สารเคมี (Cellular Lightweight Concrete) เพื่อให้เนื้อคอนกรีตฟู และทำให้แข็งตัดคอนกรีตประเภทนี้จะมีการหดตัวมากกว่า ทำให้ปูนฉาบแตกร้าวได้ง่าย ไม่ค่อยแข็งแรงคอนกรีตที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูงนี้ส่วนใหญ่เนื้อผลิตภัณฑ์มักจะมีสีเป็นสีปูนซีเมนต์ ต่างจากคอนกรีตที่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูงซึ่งจะมีเนื้อผลิตภัณฑ์เป็นผลิตภัณฑ์สีขาว

2. ระบบอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (Autoclaved System) ซึ่งแบ่งตามวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตได้เป็น 2 ประเภท คือ

ประเภทที่ 1 Lime Base ใช้ปูนขาว มาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต

ประเภทที่ 2 Cement Base ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต



ภาพคอนกรีตมวลเบาและลักษณะการใช้งาน

ชั้นคุณภาพของอิฐมวลเบา [37]

การกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มาตรฐานเลขที่ มอก. 2601-2556

- 1.) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ กำหนดรายละเอียดของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศสำหรับผนังที่ออกแบบไม่รับน้ำหนัก
- 2.) คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ซึ่งต่อไปในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า “คอนกรีตบล็อกมวลเบา” หมายถึง คอนกรีตบล็อกที่มีมวลเบากว่าคอนกรีตบล็อกที่มีขนาดเดียวกัน มีฟองอากาศเล็กแทรกกระจายในเนื้อคอนกรีตอย่างสม่ำเสมอ
- 3.) ชนิดคอนกรีตบล็อกมวลเบา ชนิดของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบ่งตามความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งออกเป็น 8 ชนิด ตามตาราง 2.1

ตาราง 2.1 ชนิดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา

ชนิด	ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งเฉลี่ย (kg/m ³)
C6	501 ถึง 600
C7	601 ถึง 700
C8	701 ถึง 800
C9	801 ถึง 900
C10	901 ถึง 1000
C12	1001 ถึง 1200
C14	1201 ถึง 1400
C16	1401 ถึง 1600

- ความต้านแรงอัด

เมื่อทดสอบแล้วคอนกรีตบล็อกมวลเบาต้องมีความต้านแรงอัดที่อายุ 28 วันเป็นไปตามตาราง 2.2

ตาราง 2.2 ความต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา

ชนิด	ความต้านแรงอัดไม่น้อยกว่า MPa (kg/cm ²)
C6 C7 C8	2.0 (20.4)
C9 C10 C12	2.5 (25.5)
C14 C16	5.0 (51.0)

- อัตราการดูดซึมน้ำ

เมื่อทดสอบแล้วอัตราการดูดซึมน้ำต้องเป็นไปตามตาราง 3

ตาราง 2.3 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกมวลเบา

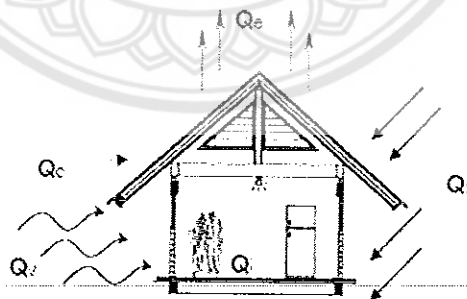
ชนิด	อัตราการดูดซึมน้ำ ไม่มากกว่า % (เศษส่วนโดยมวล)
C6 C7 C8	25

C9 C10 C12	23
C14 C16	20

ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)

การถ่ายเทความร้อนสู่อาคาร [38-39] ความร้อนที่อยู่ภายในอาคารมาจากแหล่งกำเนิดความร้อน 2 ส่วน หลักๆ คือ ความร้อนจากภายนอก และความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอาคารเอง (Q_i) เช่น เกิดจากอุปกรณ์สำนักงาน เครื่องใช้ไฟฟ้า มนุษย์ โดยทั่วไปส่วนมากแล้ว ความร้อนรวมในอาคารจะมาจากภายนอกมากกว่าและเป็นความร้อนที่ได้รับอิทธิพลจากรังสีดวงอาทิตย์ (Q_s) โดยการส่งผ่านความร้อนจะมาจากตัวกลางผนัง หลังคา อากาศที่ถ่ายเทเข้าสู่บ้าน เป็นต้น ความร้อนจะส่งผ่านเข้าสู่ภายในบ้านทำให้บ้านร้อน ดังแสดงในภาพ 1 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 กรณี ตามทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนดังนี้

1. การนำความร้อน (Conduction, Q_c)
2. การพาความร้อน (Convection, Q_v)
3. การแผ่รังสีความร้อน (Radiation, Q_e)



รูป 2.1 การนำความร้อนเข้าสู่ภายในตัวบ้าน

การคำนวณภาระความร้อนของผนังคอนกรีต ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่อาคาร เกิดขึ้นจากอิทธิพลของดวงอาทิตย์ที่ส่งผ่านมายังวัสดุอุปกรณ์และตัวกลาง ซึ่งภาระส่วนนี้ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี

1. การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อนเกิดจากบริเวณที่ร้อนหรือมีการเคลื่อนไหวโมเลกุลมากกว่า ไปสู่บริเวณที่เย็นกว่า หรือมีการเคลื่อนไหวของโมเลกุลช้ากว่า การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นทุกทิศทุกทาง วัสดุจะมีการนำความร้อนมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุลและปัจจัยต่างๆ ได้แก่ สมบัติของวัสดุ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิววัสดุ ความหนาวัสดุ และเวลาที่สัมผัส เป็นต้น ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Conductivity, k) หน่วยเป็น W/m·K หรือ Btu/(ft·h·°F) คือการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนผ่านสสารในความหนา ช่วงเวลา พื้นที่ และค่าความแตกต่างอุณหภูมิหนึ่งๆ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนใช้ในการวัดค่าความร้อนจากภาระความร้อนที่ผ่านภายในผนัง (Q_{cond}) สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{cond} = \frac{kA}{\Delta x} \Delta T \quad (2.1)$$

โดยที่ Q_{cond} = ภาระการนำความร้อน (W)
 k = ค่าการนำความร้อนของผนัง (W/m·K)
 A = พื้นที่ผิว (m^2)
 Δx = ผลต่างความหนา (m)
 ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกผนัง (K)

ความต้านทานความร้อน (Resistance: R, R-value) หน่วย $m^2 \cdot K/W$ หรือ $(ft^2 \cdot h \cdot ^\circ F)/Btu$ คือส่วนกลับค่าการนำความร้อน เป็นค่าที่นิยมใช้ในการกำหนดค่าฉนวนความร้อนภายในอาคารค่า R-value ที่มากขึ้นยิ่งแสดงค่าการเป็นฉนวนที่ดีมาก

$$R = \frac{d}{k} \quad (2.2)$$

โดยที่ R = ความต้านทานความร้อน ($m^2 \cdot K/W$)
 d = ค่าความหนาของวัสดุ (m)
 k = ค่าการนำความร้อนของผนัง (W/m·K)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Thermal transmittance) หน่วยเป็น $W/m^2 \cdot K$ หรือ $Btu/(ft^2 \cdot h \cdot ^\circ F)$ คือหน่วยการวัดปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเข้ามาในอาคารในช่วงเวลาหนึ่งและพื้นที่หนึ่ง เป็นส่วนกลับของค่า R

$$U = \frac{1}{\sum R}$$

$$= \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n} \quad (2.3)$$

โดยที่ U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W/m^2 \cdot K$)
 R = ความต้านทานความร้อน ($m^2 \cdot K/W$)

2. การพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อน คือการถ่ายเทความร้อนโดยการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านตัวกลาง เช่น อากาศ และน้ำ เมื่อสสารถูกทำให้ร้อนโมเลกุลจะเคลื่อนไหวเร็วขึ้นและแตกกระจายออกไปในทิศต่างๆ ก่อให้เกิดการขยายตัวของสสารนั้นๆ โดยของแข็งจะมีการเพิ่มปริมาตรขึ้นของเหลวและแก๊สจะมีความหนาแน่นต่ำลงและลอยตัวขึ้นการพาความร้อนโดยการพาความร้อน (Convection, Q_{conv}) สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{conv} = h_c A \Delta T \quad (2.4)$$

โดยที่ Q_{conv} = การพาความร้อน (W)
 h_c = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \cdot K$)
 A = พื้นที่ผิว (m^2)
 ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมกับอุณหภูมิผิวผนัง (K)

3. การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อโมเลกุลของสสารเกิดการเคลื่อนไหวจะคายพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การแผ่รังสีความร้อนจึงเป็นการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่งจะเคลื่อนที่จากวัตถุที่ร้อนกว่าไปสู่วัตถุที่เย็นกว่า

การเคลื่อนที่หรือการสั่นของโมเลกุลพื้นผิวของสสารจะก่อให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางได้เร็วเท่ากับความเร็วแสง การเคลื่อนที่ของโมเลกุลจะช้าลงเมื่อเปลี่ยนแปลงไปเป็นรังสีความร้อน โดยเมื่อความร้อนเคลื่อนที่ผ่านของแข็ง อากาศ หรือ สูญญากาศ ไปจนกระทบพื้นผิววัสดุอีกด้าน จะเกิดการสะสมความร้อนในด้านนั้นๆ และทำให้โมเลกุลมีการเคลื่อนไหวมากขึ้นจนอุณหภูมิสูงขึ้น และคายความร้อนออกมา การแผ่รังสีความร้อนจะเกิดการแผ่รังสีความร้อนเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทุกทิศทุกทางและไม่ขึ้นกับแรงโน้มถ่วงของโลก

อุณหภูมิโมเลกุลของพื้นผิววัสดุสามารถให้ความร้อนที่วัดได้เป็นค่าความยาวคลื่น (Wave length) หรือความถี่คลื่น (Frequency) ได้โมเลกุลของพื้นผิวแต่ละชนิดจะมีการเคลื่อนไหว หรือการสั่นที่แตกต่างกัน และแผ่รังสีความร้อนออกมาในความเร็วที่คงที่ การเคลื่อนไหวดังกล่าวจะทำให้เกิดความถี่ของ

คลื่นการแผ่รังสี โมเลกุลที่เคลื่อนที่เร็วสุดหรือร้อนสูงสุดจะคายคลื่นรังสีสั้นๆ ออกมา เช่น คลื่นรังสีจากดวงอาทิตย์จะเป็นคลื่นสั้นประมาณ 0.4-4.0 μm และโมเลกุลที่เคลื่อนที่ช้าๆ จะคายรังสีคลื่นยาวซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 8-10 μm

เมื่อพลังงานการแผ่รังสีความร้อนกระทบพื้นผิว พื้นผิวนั้นจะสามารถดูดซับความร้อน (Absorptivity, α) และเปลี่ยนพลังงานความร้อนซึ่งจะทำให้ผิววัสดุอุ่นขึ้นและสามารถสะท้อนความร้อนนั้นกลับไปได้ (Reflectivity, β) ถ้าวัสดุมีสมบัติที่ความร้อนสามารถผ่านไปได้ ความร้อนจะทะลุผ่าน (Transmissivity, T) - ชั้นวัสดุออกไป โดยที่การดูดซับความร้อน การสะท้อนความร้อน และการทะลุผ่านของความร้อนนั้น มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0-1.0

$$\alpha + \beta + T = 1 \quad (2.5)$$

โดยที่ α = ค่าการดูดซับความร้อนของวัสดุ
 β = ค่าการสะท้อนความร้อนของวัสดุ
 T = ค่าการทะลุผ่านของความร้อนในวัสดุ

ภาวะความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน (Radiation, q_{rad}) เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีอากาศเป็นตัวกลางหรือในกรณีที่เป็นสุญญากาศ คำนวณได้จาก

$$q_{\text{rad}} = \frac{q}{A} = h_r A (T_s - T_{\text{sur}}) \quad (2.6)$$

โดยที่ q_{rad} = ภาวะการแผ่รังสีความร้อน (W)
 q = อัตราการแผ่รังสีในพื้นที่ผิว ($\text{W}\cdot\text{m}^2$)
 h_r = สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน
 A = พื้นที่ผิว (m^2)
 T_s = อุณหภูมิของผิว (K)
 T_{sur} = อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (K)

$$h_r = \epsilon \sigma (T_s + T_{\text{sur}})(T_s^2 + T_{\text{sur}}^2) \quad (2.7)$$

โดยที่ ϵ = ค่าการแผ่รังสีของวัตถุ
 σ = $5.667 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
 h_r = สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

4. ค่าการถ่ายเทความร้อนรวม (Thermal transfer)

เป็นค่าที่ใช้แสดงความร้อนทั้งหมดที่ผ่านเข้ามาภายในอาคาร สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน พื้นที่ทั้งหมดที่มีการรับแสงแดด และค่าความต่างอุณหภูมิเทียบเท่าระหว่างภายนอกและภายในอาคาร

$$Q = U A \Delta T \quad (2.8)$$

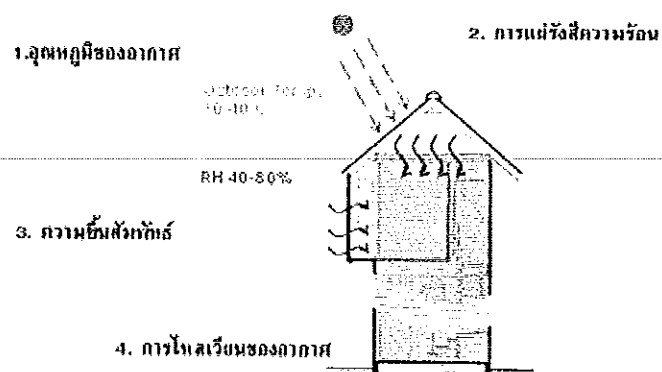
- เมื่อ $Q =$ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวม (W)
 $U =$ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($(W/m^2 \cdot K)$)
 $A =$ พื้นที่ทั้งหมดที่มีการรับแสงแดด (m^2)
 $\Delta T =$ ค่าความต่างอุณหภูมิเทียบเท่าระหว่างภายนอกและภายในอาคาร (K)

ภาวะความสบายเชิงความร้อน (Thermal comfort) [40]

ภาวะความสบายเชิงความร้อนดังภาพ 2 ของผู้อยู่อาศัยภายในอาคารนั้นเป็นหัวใจในการออกแบบสร้างอาคารต่างๆ จึงได้มีการศึกษาภาวะความสบายอยู่เสมอเนื่องจากมีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของผู้อยู่อาศัย อีกทั้งยังส่งผลต่อเรื่องของการใช้พลังงานเพื่อปรับสภาวะอากาศให้รู้สึกสบายโดยปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะความสบาย (Comfort) แก้อาคาร ได้แก่

- ก. อุณหภูมิอากาศ (Air temperature)
- ข. การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)
- ค. ความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity)
- ง. การไหลเวียนของอากาศ (Air movement)

ปัจจัยพื้นฐานในการพิจารณา เพื่อให้เกิดสภาวะน่าสบายแก่อาคาร



รูป 2.2 ปัจจัยพื้นฐานในการพิจารณาเพื่อให้เกิดสภาวะความสบายแก่อาคาร [40]

ปัจจัยดังกล่าวนี้เป็นปัจจัยหลักที่จะใช้ในการสร้างแนวทางในการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคาร โดยจากการศึกษาการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารจะพิจารณากรอบอาคาร 2 ส่วนด้วยกัน คือ หลังคา และผนังอาคาร โดยเมื่อพิจารณาถึงวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นกรอบอาคารนี้ พบว่าคุณสมบัติวัสดุผสมที่มีความน่าจะเป็นตัวแทนวัสดุสำหรับเปลือกอาคารที่ดีคือ วัสดุที่มีการใช้งานร่วมกันระหว่างฉนวนประเภท ปิดและมวลสาร โดยผิวภายนอกของอาคารจะเป็นการป้องกันการแพร่ผ่านของความร้อนและความชื้น เข้าสู่ภายในอาคาร ส่วนภายในของอาคารจะเป็นการสร้างเสถียรภาพทางอุณหภูมิให้กับอาคาร

เขตความสบาย (Comfort zone)

เขตความสบาย คือ การหาช่วงของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลมที่เหมาะสมที่ทำให้มนุษย์เรารู้สึกว่าอยู่ในสภาวะที่น่าสบาย เนื่องจากไม่สามารถกำหนดค่าภาวะความสบายออกมาเป็นตัวเลขได้จึงต้องพูดเป็นเขตหรือเป็นช่วงทำให้ทราบว่าคนเราสามารถมีความสบายหรืออยู่ในสภาวะน่าสบายในจุดที่ต่างกันได้ แต่จุดของความแตกต่างนั้นไม่ควรมีความห่างกันมาก เมื่อความสบายของคนต่างชาติต่างผิวพรรณซึ่งอยู่ต่างสภาพภูมิอากาศมีความแตกต่างกัน เขตความสบายของคนที่อยู่ในสภาพภูมิอากาศต่างกันย่อมมีความแตกต่างกันด้วย

การควบคุมภาวะความสบายในอาคาร

การควบคุมสภาวะน่าสบายในอาคารและประหยัดพลังงานไปด้วย ซึ่งอาจแยกเป็นแนวทางของการออกแบบเพื่อการประหยัดพลังงานได้ 2 แนวทาง คือ

2.1 แบบพึ่งพาธรรมชาติ

การออกแบบอาคารโดยวิธีการพึ่งพาธรรมชาติ หมายถึง การออกแบบอาคารที่พยายามดึงเอาประโยชน์จากพลังงานจากธรรมชาติที่ไม่หมดไปเข้ามาใช้ในอาคาร เพื่อให้อาคารเข้าสู่สภาวะน่าสบาย โดยการเจาะช่องเปิดรับลมประจำถิ่นให้เข้ามาช่วยถ่ายเทระบายความร้อนในอาคาร หรือการเจาะช่องแสงเพื่อใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติในช่วงเวลาที่สามารถทำได้ ทดแทนการใช้แสงประดิษฐ์

2.2 แบบพึ่งพาเครื่องกล

หากอาคารที่ออกแบบมีหลายปัจจัย ที่ทำให้ไม่สามารถจะนำประโยชน์จากการใช้พลังงานจากธรรมชาติที่ไม่หมดไปเข้ามาทำให้เกิดสภาวะน่าสบายได้อย่างในแนวทางแรก การออกแบบในแนวทางที่สองซึ่งต้องพึ่งพาเครื่องกลจึงเข้ามาเป็นทางเลือก เช่น ใช้เครื่องปรับอากาศในการช่วยถ่ายเทความร้อนปรับอุณหภูมิภายในอาคารเพื่อสร้างภาวะความสบายขึ้นตลอดจนการเลือกใช้ เครื่องใช้ไฟฟ้าหรือหลอดไฟที่ออกแบบพิเศษเพื่อช่วยประหยัดพลังงาน และนอกจากการออกแบบที่ดีจะสามารถช่วยประหยัดพลังงานแล้ว ยังต้องมาจากผู้ใช้งานอาคารที่ควรรู้จักใช้อุปกรณ์อาคาร และเครื่องอำนวยความสะดวกในอาคารอย่างถูกต้อง ประหยัด และรู้คุณค่าประกอบกันไปอีกด้วย

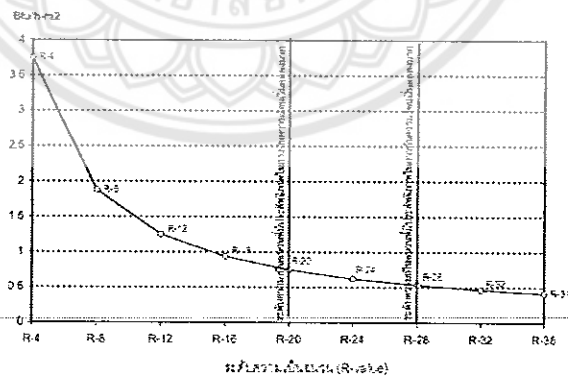
การป้องกันความร้อนให้กับเปลือกอาคาร

3.1 การป้องกันความร้อนทางหลังคา

หลังคาเป็นพื้นที่ที่มีระดับใกล้เคียงแนวนอนจึงมีผลให้มีปริมาณการดูดซับรังสีดวงอาทิตย์สูงกว่าพื้นที่ในแนวระนาบตั้ง เช่น ผนังอาคาร นอกจากนี้หลังคายังเป็นส่วนบนสุดของอาคารซึ่งทำหน้าที่ป้องกันแสงอาทิตย์ให้กับอาคารทั้งหลัง หลังคาจึงเป็นส่วนที่มีความร้อนสูงที่สุดในองค์ประกอบทั้งหมดของอาคาร หลังคาที่มีสีเข้ม เช่น สีน้ำตาลแดงหรือสีน้ำเงินเข้มอาจมีอุณหภูมิผิวภายนอกสูงถึง 60°C ในช่วงที่มีแดดจัด [41]

การป้องกันความร้อนจากหลังคาจึงเป็นจุดวิกฤตในการป้องกันความร้อนที่จะแพร่ผ่านเข้าสู่ภายในอาคารเนื่องจากสภาพแวดล้อมภายนอก การป้องกันความร้อนจากหลังคาที่เหมาะสมอาจทำได้โดย

3.1.1 การตัดแบ่งพื้นที่ใต้หลังคาและส่วนภายในอาคารด้วยฉนวนกันความร้อน การตัดแบ่งพื้นที่ระหว่างพื้นที่ใต้หลังคาที่มีความร้อนสูง และส่วนภายในอาคารที่ต้องการให้มีความร้อนแพร่ผ่านเข้ามาให้น้อยที่สุด จำเป็นจะต้องใช้วัสดุฉนวนที่มีความสามารถในการกันความร้อนสูงมากสำหรับประเทศไทย และต้องมีการเลือกใช้ระบบฝ้าเพดานที่มีรอยรั่วให้น้อยที่สุด เพื่อป้องกันการรั่วซึมจากอากาศร้อนในส่วนพื้นที่ใต้หลังคาที่อาจรั่วซึมเข้ามาภายในอาคาร ฉนวนจะทำหน้าที่ลดความร้อนจากพื้นที่ใต้หลังคาให้แพร่เข้าสู่ภายในอาคารน้อยที่สุด ถ้าประมาณว่าขอบเขตสูงสุดของเขตสบายอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 27°C ตามแผนภูมิไบโอไคลเมติก ส่วนอุณหภูมิของพื้นที่ใต้ฝ้าเพดานอาจอยู่ที่ประมาณ $40-45^{\circ}\text{C}$ ในช่วงที่มีความร้อนสูง (ค่าอุณหภูมิใต้ฝ้านี้เป็นค่าประมาณกับหลังคาประเภทมวลสาร เช่น หลังคากระเบื้องต่างๆ ค่านี้อาจสูงมากขึ้นถ้าเป็นหลังคาที่มีมวลสารน้อยและบาง เช่น หลังคาเหล็ก หลังคาสังกะสี ฯลฯ) จะพบว่าค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศภายในที่ต้องการและค่าอุณหภูมิใต้ฝ้าเพดานมีความแตกต่างประมาณ $13-18^{\circ}\text{C}$ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับฉนวนที่มีค่า R-value แตกต่างกันจะมีการถ่ายเทความร้อนดังแสดงในภาพ 2.3



รูป 2.3 ระดับความเป็นฉนวนกับค่าความต้านทานความร้อน

จากการศึกษาจะพบว่าความมีประสิทธิภาพจะตกลงอย่างมากตั้งแต่ช่วง R-20 ถึง R-28 และหลังจากนั้นจะเป็นส่วนที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนไม่คุ้มค่ากับระดับการเพิ่มฉนวน ดังนั้น

การใช้ฉนวนสำหรับหลังคาตามสมมุติฐานนี้อาจใช้ได้ตั้งแต่ระดับความเป็นฉนวนที่ R-20 ไปจนถึง R-28 สำหรับการตัดแบ่งพื้นที่ใต้หลังคาออกจากพื้นที่ภายในอาคาร

3.1.2 การระบายอากาศร้อนภายใต้หลังคา การระบายอากาศร้อนที่สะสมใต้หลังคาออกไปเป็นอีกทางเลือกที่จะช่วยลดความร้อนออกจากพื้นที่ใต้หลังคาได้ อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวยังมีข้อติดขัดอยู่ที่ความสามารถในการระบายความร้อนออกจากพื้นที่ด้วยการไหลเวียนอากาศตามธรรมชาติ เนื่องจากค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ต้องการให้ภายในอาคารและค่าอุณหภูมิอากาศใต้หลังคาที่มีความร้อนสูงมีค่าความแตกต่างกันมาก ความเร็วลมที่จะระบายความร้อนออกไปจะมีค่าสูงกว่าที่จะมีอยู่ตามสภาพแวดล้อมในธรรมชาติ การระบายอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวจึงไม่เพียงพอในการป้องกันความร้อนจากหลังคา และจำเป็นจะต้องใช้ฉนวนเข้ามาป้องกันความร้อนจากพื้นที่ใต้หลังคาเพิ่มเติม

3.2 การป้องกันความร้อนให้กับผนังอาคาร

การใช้ความเย็นจากดินกับส่วนพื้นของอาคาร พื้นอาคารที่สร้างจากวัสดุที่นำความร้อนได้ดี เช่น พื้นคอนกรีตในบ้านพักอาศัยทั่วไป ถ้าสามารถทำให้ผิวด้านล่างสัมผัสกับพื้นดินโดยมีการกันความชื้นแทรกซึมอย่างถูกต้อง จะพบว่าห้องภายในจะสามารถใช้ประโยชน์จากระดับอุณหภูมิที่ต่ำและมีความคงที่สูงจากดินข้างใต้อาคารได้ เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากดินเป็นวัสดุที่มีมวลสารมากจึงมีค่าความจุความร้อนสูง ดินที่ระดับความลึกมากพอสมควรจึงไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตลอดวันมากนัก นอกจากนี้ดินข้างใต้อาคารเป็นส่วนที่ไม่ได้รับพลังงานความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์และสภาพแวดล้อมภายนอกตลอดวัน ดินข้างใต้อาคารจึงมีอุณหภูมิต่ำกว่าสภาพแวดล้อมภายนอก อาคารที่ได้รับการออกแบบให้มีส่วนพื้นสัมผัสกับพื้นดินข้างใต้จะสามารถใช้ประโยชน์ในการสร้างพื้นที่มีอุณหภูมิผิวต่ำตลอดวันได้

อย่างไรก็ตามการออกแบบให้ส่วนพื้นสัมผัสกับดินอาจไม่เหมาะสมกับอาคารปรับอากาศนั้ เพราะจะเป็นการเพิ่มมวลสารที่เครื่องปรับอากาศต้องขจัดความร้อนออกจากวัสดุเพิ่มขึ้น

การหน่วงความร้อน (Thermal time lag)

การหน่วงความร้อน เป็นช่วงเวลาที่วัสดุสามารถเก็บกักปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้ามาได้เป็นระยะเวลาหนึ่ง จนวัสดุอึดตัวและคายความร้อนออกมาภายใน ทำให้ช่วงเวลาที่เกิดความร้อนสูงสุดภายในนั้น เลื่อนออกไปจากช่วงเวลาที่เกิดความร้อนสูงสุดภายนอกได้ระยะเวลาหนึ่ง วัสดุที่มีมวลมากจะมีค่าหน่วงความร้อนมากกว่าวัสดุที่มีมวลน้อย เวลาที่ความร้อนผ่านจากผนังด้านนอกสู่ด้านใน ส่วนปัจจัยการลดลงคือ สัดส่วนการลดลงของแอมพลิจูดอุณหภูมิ [56-57] ดังนั้น จึงสามารถกำหนดการหน่วงความร้อนและปัจจัยการลดลง ได้ดังสมการ (2.9) และ (2.10)

$$\Phi = T_{q_i, \max} - T_{q_e, \max} \quad (2.9)$$

$$f = \frac{A_i}{A_e} = \frac{q_{i, \max} - q_{i, \min}}{q_{e, \max} - q_{e, \min}} \quad (2.10)$$

ซึ่ง $T_{qi,max}$, $T_{qe,max}$ คือเวลาที่ฟลักซ์ความร้อนผิวผนังด้านในและด้านนอกอยู่ที่สูงสุด A_i และ A_e คือแอมพลิจูดของคลื่นความร้อนด้านในและด้านนอกของผนัง และ $Q_{i,max}$, $Q_{i,min}$, $Q_{e,max}$, $Q_{e,min}$ คือฟลักซ์ความร้อนสูงสุดและต่ำสุดของผนังด้านในและด้านนอก ตามลำดับ

สารเปลี่ยนสถานะ

สารเปลี่ยนสถานะ (Phase change material หรือ PCM) [58] หมายถึง สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เช่น พาราฟิน กรดไขมัน เกลือไฮเดรท โลหะผสม และสารอื่นๆ ที่ทำหน้าที่ดูดซับ (Absorb) พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ในเวลากลางวัน ทำให้สามารถป้องกันความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารที่พักอาศัยได้ [59]

1. คุณสมบัติของ PCM

PCM ที่ใช้ในการออกแบบระบบสะสมความร้อนควรมีคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางจลน์ และคุณสมบัติทางเคมีดังต่อไปนี้

1.1. คุณสมบัติทางกายภาพ (Thermophysical properties)

- (ก) อุณหภูมิการหลอมเหลวมีความเหมาะสมกับการใช้งาน
- (ข) ความร้อนแฝงของความจุต่อหน่วยปริมาตรมีค่าสูง ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวต่อหน่วยปริมาตรสูง ดังนั้นความต้องการปริมาณภาชนะที่ใช้สะสมจำนวนพลังงานมีค่าน้อย
- (ค) มีค่าความร้อนจำเพาะสูงที่ให้ค่าเพิ่มจากการจัดเก็บความร้อนแบบสัมผัส
- (ง) มีค่าการนำความร้อนสูงในสถานะของแข็งและของเหลวซึ่งช่วยในการเก็บและการปล่อยพลังงานของระบบสะสมความร้อน
- (จ) ในการเปลี่ยนสถานะนั้นปริมาตรมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากและที่อุณหภูมิการทำงานมีความดันไอน้อยช่วยลดปัญหา Containment
- (ช) การหลอมเหลวสอดคล้องกันของ PCM สำหรับความจุของการจัดเก็บคงที่ของวัสดุในระหว่างวัฏจักรการแข็งตัวและการหลอมเหลว

1.2. คุณสมบัติทางจลน์ (Kinetic properties)

- (ก) อัตราการเกิด Nucleation สูง ช่วยหลีกเลี่ยงการเกิด Super cooling ในการเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว
- (ข) อัตราการเกิดผลึกสูง ดังนั้นระบบจะตอบสนองความต้องการของการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่จากระบบการจัดเก็บ

1.3. คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties)

- (ก) การเปลี่ยนรอบการแข็งตัวและการหลอมเหลวเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์
- (ข) ไม่มีการเสื่อมสภาพหลังจากรอบของแข็งและของเหลว
- (ค) ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน (Corrosiveness) ในวัสดุโครงสร้าง
- (ง) ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และไม่ระเบิด

2. หลักการทำงานของสารเปลี่ยนสถานะ

หลักการทำงานของสารเปลี่ยนสถานะ เกิดขึ้นจากความสามารถในการดูดซับความร้อน (Absorb) ในช่วงกลางวันที่มีอุณหภูมิสูง และปลดปล่อยความร้อน (Release) ออกมาในช่วงเวลากลางคืนซึ่งมีอุณหภูมิต่ำลง หลังจากนั้นจะสามารถดูดซับความร้อนในตอนกลางวันได้อีกครั้ง โดยความร้อนที่ดูดซับจะถูกเก็บไว้ในรูปความร้อนแฝง (Latent heat) และไม่มีผลกระทบต่อมวลโครงสร้างรวม

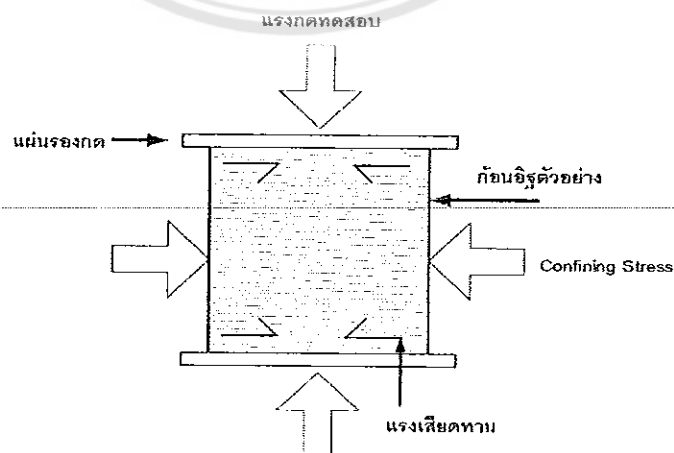
ทฤษฎีแรงอัด (Compressive strength) [60]

เพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา ให้เป็นไปตามมาตรฐานคอนกรีต โดยทำการตัดก้อนตัวอย่างขนาด 75 mm x 75 mm x 75 mm ทำการทดสอบเมื่อก้อนตัวอย่างผ่านการอบที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 h

1. วิธีทดสอบ

- 1.1 เปิดเครื่องทดสอบค่าการรับแรงอัดก่อนทำการกดก้อนตัวอย่างทดสอบประมาณ 10 min เพื่อเพิ่มแรงในการทดสอบ
- 1.2 ให้ทำการกดก้อนตัวอย่างในแนวที่ตั้งฉากกับด้านยาวของก้อนตัวอย่าง
- 1.3 จดบันทึกค่าที่รับแรงอัดสูงสุดเมื่อก้อนตัวอย่างที่เกิดการแตกเสียหายโดยค่าที่ได้ให้จดเป็นหน่วยตัน เพื่อใช้ในการคำนวณค่ารับแรงอัดของอิฐมวลเบา

โดยขณะที่กดก้อนตัวอย่าง ก้อนตัวอย่างจะแตกออกด้านข้างทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองกด แรงเสียดทานดังกล่าวจะก่อให้เกิดแรงต้านทานต่อการแตกด้านข้างของก้อนตัวอย่างที่เรียกว่า Confining stress ดังรูป 2.4 โดยค่า Confining stress นี้จะมีค่ามากถ้าผิวสัมผัสของก้อนตัวอย่างกับเครื่องกดมีค่ามาก ดังนั้นผลการทดสอบกำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ จึงมีค่า Confining stress



รูป 2.4 ลักษณะแรงต้านต่อการแตกด้านข้าง (Confining stress)

การคำนวณผลการทดสอบดังสมการ 2.11 เพื่อหาพื้นที่รับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างอิฐมวลเบา ทดสอบตามมาตรฐาน

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{A} \times E_r \quad (2.11)$$

โดยที่

- σ = ค่าการต้านแรงอัด (MPa)
 F_{\max} = ค่ารับแรงอัดสูงสุด (N)
 E_r = ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องทดสอบ
 A = พื้นที่ผิวภาคตัดขวางที่รับน้ำหนักกดของแท่งทดสอบ (mm^2)

ทฤษฎีการทดสอบแรงดัดของคอนกรีต (Flexural strength) [60]

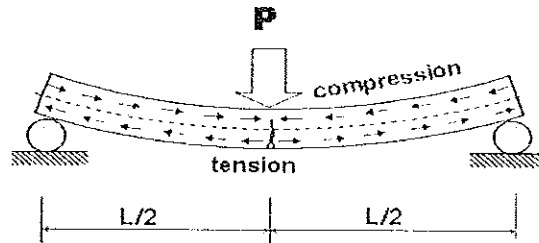
1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีต โดยทดสอบกับคานคอนกรีต ที่วางบน Simple support (Simple beam) Center-point loading ผลของค่ากำลังต้านทานแรงดัดจะอยู่ในรูปของโมดูลัสการแตกกร้าว (Modulus of rupture) โดยเป็นค่าหน่วยแรงดึงสูงสุด ณ จุดที่แตกกร้าว ในคานที่ทำการทดสอบ ซึ่งหาได้จากสมการ

$$f_b = \frac{M \times c}{I} \quad (2.12)$$

โดยที่

- f_b = กำลังดัด (kg/cm^2)
 M = ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่หน้าตัด (kg-cm)
 c = ระยะจากแนวสะเทินถึงผิวคานที่ไกลที่สุด (cm)
 I = โมเมนต์เฉื่อยของหน้าตัด (cm^4)



รูป 2.5 การทดสอบแรงดัด

คำนวณค่ากำลังรับแรงดัด (Modulus of rupture)

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2.13)$$

- เมื่อ R = โมดูลัสการแตกร้าว (kg/m^2)
 P = น้ำหนักสูงสุด (Maximum Load) (kg)
 L = ความยาวคาน (Span Length) (m)
 b = ความกว้างเฉลี่ยของคาน (m)
 d = ความลึกเฉลี่ยของคาน (m)

การดูดกลืนน้ำ [60]

เพื่อทดสอบการกลืนน้ำซึมน้ำของอิฐมวลเบา การหาการดูดซึมของน้ำคิดจากค่าเฉลี่ยน้ำหนักของอิฐแห้งและน้ำหนักของอิฐที่ดูดซึมน้ำเป็นกรัม ดังสูตร การคำนวณอัตราการดูดกลืนน้ำโดยหาจากสมการดังนี้

$$\text{น้ำหนักน้ำที่ดูดกลืน (g)} = \text{น้ำหนักหลังแช่น้ำ 24 ชม. (g)} - \text{น้ำหนักก่อนแช่น้ำ (g)}$$

$$\text{ร้อยละการดูดกลืนน้ำ} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (2.14)$$

- โดยที่ W_1 = น้ำหนักก่อนแช่น้ำ (g)
 W_2 = น้ำหนักน้ำที่ดูดกลืน (g)

ความหนาแน่นเชิงปริมาตร

การทดสอบเพื่อหาความหนาแน่นของอิฐมวลเบาตามมาตรฐานการทดสอบ ดังสมการ ต่อไปนี้

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2.15)$$

โดยที่ ρ = ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง (kg/dm^3)

M = มวลของชิ้นทดสอบหลังอบ 105°C (kg)

V = ปริมาตรของชิ้นทดสอบ (dm^3)

ความพรุน (Porosity)

ความพรุน หมายถึง อัตราส่วนปริมาตรจำนวนช่องว่างต่อปริมาตรภายนอกของตัวอย่างคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยที่

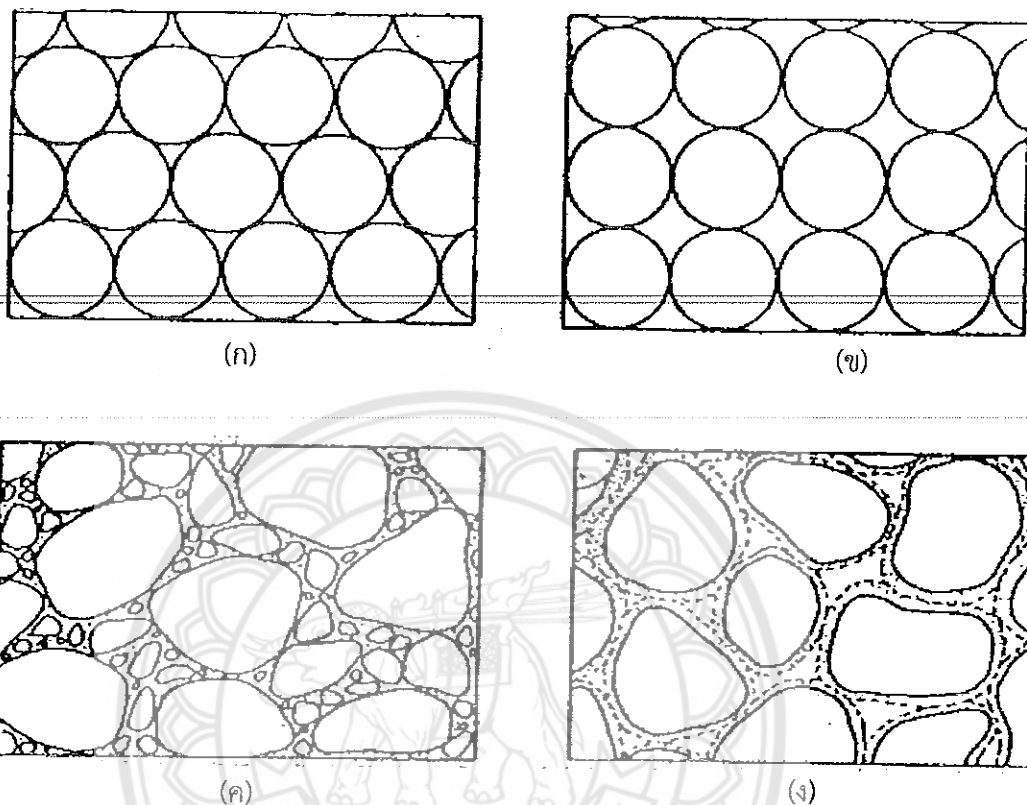
$$P = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \quad (2.16)$$

โดยที่ P = ค่าความพรุน (%)

V_v = ปริมาตรช่องว่าง (m^3)

V_t = ปริมาตรของตัวอย่างทั้งหมด (m^3)

เม็ดตะกอนกลมที่มีการปรับเรียงตัวแบบ การจับตัวแน่น (Close packing) มีค่าความพรุน 27% (รูป 2.6 ก) ส่วนเม็ดตะกอนกลมที่มีการปรับเรียงตัวหลวมแบบ การจับตัวหลวม (Open packing) มีค่าความพรุน 47% (รูป 2.6 ข) ความเข้มข้นของวัสดุเชื่อมประสานทำให้ค่าความพรุนลดน้อยลง การละลายของแร่บางชนิดออกจากหินกับรอยแตกของหิน ก็มีผลทำให้ความพรุนของหินมีค่ามากขึ้น



รูป 2.6 ความพรุน (ก) ทรงกลมมีความพรุน 27 % (ข) ทรงกลมจัดเรียงตัวหลวมมีความพรุน 47 % (ค) คัดขนาดไม่ดีความพรุนต่ำ (ง) คัดขนาดดีความพรุนสูง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

O. Kaynakli [61] ได้ปรับปรุงประสิทธิภาพทางความร้อนของอิฐมวลเบาอบไอน้ำ ซึ่งทำให้เป็นฉนวนความร้อนอีกอย่างหนึ่ง สามารถช่วยลดความต้องการการใช้พลังงานลงได้

F. Kuznik and J. Virgone [62] ได้ศึกษาและเปรียบเทียบผนังอาคารที่มีสารเปลี่ยนสถานะเป็นส่วนประกอบกับผนังอาคารที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะเป็นส่วนประกอบ โดยสารเปลี่ยนสถานะที่ศึกษาอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 13.6°C และมีความร้อนแฝงเท่ากับ 106 J/g โดยได้ทำการศึกษา 3 กรณี คือช่วงฤดูร้อน กลางฤดู และฤดูหนาว พบว่าทั้ง 3 กรณีของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะเป็นส่วนประกอบมีอุณหภูมิภายในห้องต่ำกว่าผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะเป็นส่วนประกอบ และในช่วงอุณหภูมิอากาศสูงสุดของรอบวันในฤดูร้อน ผนังห้องภายในมีอุณหภูมิต่างกันถึง 4.2°C

Shilei และคณะ [63] ได้ศึกษาและเปรียบเทียบผนังห้องประเภทยิปซัมแบบธรรมดาและแบบที่มีสารเปลี่ยนสถานะเป็นส่วนประกอบ โดยจะเคลือบที่ผิวผนังเป็นสัดส่วนร้อยละ 26 โดยน้ำหนัก สารเปลี่ยน

สถานะที่ใช้เป็นประเภท Capric acid (CA) และ Lauric acid (LA) ซึ่งผสมกันอยู่ในสัดส่วนร้อยละ 82:18% พบว่าผนังห้องที่มีสารเปลี่ยนสถานะเป็นส่วนประกอบจะมีความสามารถในการกักเก็บความร้อนได้สูงกว่าผนังแบบธรรมดาโดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 13,212 kJ ทำให้ห้องที่ผนังประกอบด้วยสารเปลี่ยนสถานะสามารถลดการสิ้นเปลืองพลังงานของระบบและช่วยประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้

Gracia และคณะ [64] ได้ทำการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของอาคารที่มีส่วนประกอบ PCM ด้วยวิธี Eco-Indicator 99 พบว่าการใช้ PCM ประเภท Salt hydrate ช่วยลดผลกระทบต่อการผลิตและการกำจัดคือ PCM ประเภท Paraffins และการใช้งานในสภาพอากาศที่ใกล้เคียงกันตลอดทั้งปี ช่วยส่งผลให้การใช้งาน PCM เกิดประโยชน์สูงสุด และระยะเวลาการคืนทุนของ Salt hydrate และ Paraffins มีค่าเท่ากับ 25 และ 61 ปี ตามลำดับ

โยธิน อึ้งกุล [65] ได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติทางกล (ความต้านทานแรงอัด ความหนาแน่น และอัตราการดูดกลืนน้ำ) ของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำแบบผสมตะกอนน้ำตาล (AAC-SS) โดยใช้กากตะกอนน้ำตาลมาเป็นส่วนผสม เพื่อทดแทนการใช้ทรายที่ผ่านกระบวนการบดอย่างละเอียด และวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำแบบผสมตะกอนน้ำตาลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการศึกษาพบว่ามีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระบบแบบร่างแหตาข่ายของผลึก Tobermorite ที่สัดส่วนผสมแทนที่ทราย 20 % เป็นสัดส่วนที่ดีที่สุด โดยมีค่าความต้านทานแรงอัดเพิ่มมากขึ้น แต่ความหนาแน่นมีค่าลดลง และผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.1505-2541 และจัดอยู่ในชั้นคุณภาพ 4 ชนิด 0.7

บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา และคณะ [66] ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบสมรรถนะทางความร้อนระหว่างบ้านจำลองทั้งสองหลังที่ใช้ผนังคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำแบบผสมตะกอนน้ำตาล (AAC-SS) กับผนังคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำทั่วไป (AAC) ทำการเปรียบเทียบโดยใช้บ้านจำลองขนาดเล็กมีผนัง 4 ด้าน แต่ละด้านมีขนาดพื้นที่เท่ากับ 2.7 m^2 มีขนาดปริมาตรเท่ากับ 4.05 m^3 ผนังมีความหนาเท่ากับ 0.075 m ไม่ฉาบปูนและทาสีบนผนังทั้งภายในและภายนอก ทำการทดลองโดยติดตั้งเครื่องปรับอากาศ และปิดประตูหน้าต่างทุกบาน ผลจากการศึกษาพบว่าบ้านที่ใช้ผนัง AAC มีอุณหภูมิอากาศภายในบ้านสูงกว่าบ้านที่ใช้ผนัง AAC-SS และความชื้นอากาศภายในของบ้านทดสอบไม่แตกต่างกันมาก และยืนยันได้ถึงประสิทธิภาพที่ดีในด้านสมรรถนะทางความร้อน ในการลดความชื้นอากาศของผนัง AAC-SS ภายใต้สภาพอากาศแบบร้อนชื้นของประเทศไทย

วีระศักดิ์ ละอองจันทร์และคณะ [67] ได้ศึกษาการใช้เถ้าขยะชีวมวลในการพัฒนานวัตกรรมผนังคอนกรีตมวลเบาเพื่อเป็นฉนวนกันความร้อนสำหรับอาคาร โดยในส่วนของงานวิจัยใช้เถ้าขยะชีวมวลคือ เถ้าแกลบ, เถ้าอ้อย ผสมกับ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ทรายในอัตราส่วนต่างๆ ทำการศึกษากำลังอัดของก้อนมอร์ต้ามวลเบาตัวอย่างขนาด $5.0 \times 5.0 \times 5.0$ เซนติเมตร ทดสอบการเป็นฉนวนกันความร้อนในแบบห้องจำลองภาคสนามรวมทั้งการทดสอบการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่างคอนกรีตบล็อก จากการศึกษาพบว่ากำลังอัดของก้อนมอร์ต้าตัวอย่างที่ อายุ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ผลการทดลองพบว่ากำลังอัดนั้นความแข็งแรงขึ้นอยู่กับปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ ถ้าใช้ปูนซีเมนต์มากค่ากำลังอัดของตัวอย่างจะมากขึ้นตามไปด้วย ในส่วนของการศึกษาการเป็นฉนวนกันความร้อนของคอนกรีตบล็อกในแบบห้อง

ทดสอบและจำลองพบว่าคอนกรีตบล็อกในส่วนผสมของเถ้าแกลบมีความเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดีกว่าคอนกรีตบล็อกในส่วนผสมของเถ้าอ้อย เนื่องจากเถ้าแกลบมีความละเอียดมากกว่าเถ้าอ้อย และการศึกษาการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่างคอนกรีตบล็อก พบว่าก้อนตัวอย่างคอนกรีตบล็อกในส่วนผสมของเถ้าแกลบมีการดูดซึมน้ำ ร้อยละ 32 ซึ่งมีมากกว่าก้อนตัวอย่างคอนกรีตบล็อกในส่วนผสมเถ้าอ้อยมีการดูดซึมน้ำร้อยละ 31

Rahman, MA. [68] ได้ศึกษาการผลิตคอนกรีตบล็อกโดยใช้เถ้าแกลบพบว่าเถ้าแกลบสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ ถึงร้อยละ 40 โดยไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงกดซึ่ง สามารถที่จะประยุกต์ใช้เป็นอิฐบล็อกที่ไม่รับน้ำหนักและรับน้ำหนักได้

บุรฉัตรและพิชัย [69] ได้ศึกษาศึกษาศึกษาคอนกรีตผสมซีเถ้าแกลบเสริมใยปาล์ม พบว่าส่วนผสมที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์ คืออัตราส่วนเส้นใยต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.300 โดยน้ำหนักและมีหน่วยมวลต่อปริมาตร เท่ากับ 750 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซึ่งให้ สมบัติทางด้านความต้านทานการอัดและกำลังดัดที่สูง และมีความทนทานของผลิตภัณฑ์ มากขึ้นเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์เสริมเส้นใยไม้ที่มีขายตามท้องตลาด

วชิระ แสงรัศมี [70] ได้ศึกษาการหาศักยภาพของเยื่อกระดาษเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตกระดาษเพื่อนำมาผลิตเป็นวัสดุก่อสร้างมวล ศึกษาผลของการใช้วัสดุดิบที่แตกต่างกันระหว่างการใช้ดินลูกรังกับทรายผสมซีเมนต์โดยใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำไปผลิตเป็นบล็อกก่อสร้างขนาด 20x40x7.5 ซม. และบล็อกประสานขนาด 12.5x25x10 ซม. แล้วนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับบล็อกก่อสร้างที่จัดจำหน่ายในท้องตลาด ขึ้นทดสอบค่าการรับแรงอัด ความหนาแน่น ค่าการดูดซึมน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของขึ้นทดสอบ และนำอัตราส่วนที่เหมาะสมมาผลิตบล็อกต้นแบบทดสอบตาม มอก.57-2530 ภายหลังจากการบ่มครบ 28 วัน นำผลสมบัติของวัสดุมาวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าต้านทานความร้อนของวัสดุ ผลการศึกษาพบว่าเยื่อกระดาษเหลือทิ้ง สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุดิบผสมมวลน้ำหนักเบาและเป็นฉนวนกันความร้อนได้โดยการผลิตบล็อกต้นแบบขนาด 20x40x7.5 ซม. ด้วยอัตราส่วน (SP6) 1:5:0.02:0.3 (ซีเมนต์:ทราย:ผงสี:เยื่อกระดาษ) จะให้ความหนาแน่นที่ 1264.09 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, ค่าการดูดซึมน้ำ 19.99% ,ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.929 วัตต์ / เมตรเคลวิน และค่าการรับแรงอัด 39.66กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 58-2530 บล็อกคอนกรีตชนิดไม่รับน้ำหนัก พบว่าบล็อกประสานจากวัสดุใหม่นี้มีความหนาแน่นลดลงร้อยละ 22.5 และมีค่าการนำความร้อนต่ำลงร้อยละ 34

ฉวนิกาและมนตรี [71] ได้ศึกษาศึกษาอัตราส่วนของแกลบในการผลิตอิฐมวลเบา จากการศึกษาสมบัติต่างๆพบว่าสามารถใช้แกลบแทนทรายได้มากกว่าร้อยละ 75 คอนกรีตที่ได้จะมีค่าความต้านทานต่อแรงอัดต่ำกว่ามาตรฐานแต่น้ำหนักลดลงมากกว่าคอนกรีตธรรมดา มากจึงนำไปใช้ในการก่อสร้างที่ไม่ต้องการการรับแรงอัดสูงได้

ชุมพล [72] ได้ศึกษาสมบัติของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าแกลบและซีเถ้าลอยจาก การทดลอง พบว่าส่วนผสมที่มีซีเถ้าแกลบมากจะมีความต้านทานการอัดสูงในช่วงแรกเพราะซีเถ้าแกลบมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาต่อส่วนผสมของคอนกรีตจะมีความต้องการน้ำหนักเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีพื้นที่ผิวมาก

อนุชิต [73] ได้ศึกษาการทำปูนซีเมนต์จากเถ้าแกลบ พบว่ามอร์ต้าและคอนกรีตที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบเท่ากับร้อยละ 30 ที่ อายุ 28 วัน ใกล้เคียงกับคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยที่กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบขามีความต้านทานการอัดสูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำ

บุรฉัตร และพิชัย [74] ศึกษาคอนกรีตผสมซีเถ้าแกลบ โดยการใช้ซีเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมสำหรับการหล่อคอนกรีต พบว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความละเอียดของซีเถ้าแกลบจะทำให้ได้ค่าความต้านทานการอัดเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้ความสามารถในการไหลลดลง ตลอดจนศึกษาความต้านทานต่อสภาพความเป็นกรด พบว่าซีเถ้าแกลบมีความสำคัญในการปรับปรุงความต้านทานดังกล่าวเป็นอย่างมาก



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี อุปกรณ์เครื่องมือ และวิธีการทดลองที่ใช้ในการศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อนของอิฐมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าขานอ้อย และสารเปลี่ยนสถานะ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 วัสดุุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ตราดอกบัวแดง)
2. เถ้าขานอ้อย
3. ทรายละเอียด
4. น้ำ
5. น้ำยาผลิตโฟมสำหรับคอนกรีต (foaming agent)
6. สารเปลี่ยนสถานะ (PCM)
7. พลาสติกบรรจุสารห่อหุ้ม

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ถังปั่นปูน
2. ถังใบเล็กสำหรับตวงน้ำและตักปูน
3. ถังพลาสติกชนิดหนาสำหรับเตรียมส่วนผสม
4. ถังมือยางและผ้าปิดจมูก
5. ดอกสว่านสำหรับปั่นปูน
6. สว่านปั่นปูน
7. เครื่องชั่งสปริง ขนาดกลาง (2 หน้า) น้ำหนักขนาด 7 กิโลกรัม ความละเอียด 2 กรัม
8. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล Item PA4102 บริษัท OHAUS สามารถชั่งน้ำหนักได้มากที่สุด 4,100กรัม มีความละเอียด 0.01 กรัม [ดังรูป 3.6]
9. เครื่องผลิตโฟม
10. แม่พิมพ์สำหรับเตรียมตัวอย่าง ขนาด 7 cm x 7 cm x 7 cm
11. กาละมังสำหรับแช่ตัวอย่าง
12. น้ำมันพืช

13. แปรงทาสี
14. ไมโครมิเตอร์ขนาด 50-75 mm ความละเอียด 0.01 mm
15. แม่พิมพ์สำหรับเตรียมตัวอย่าง ขนาด 7 cm x 20 cm x 60 cm [ดังรูป 3.7]
16. ประแจเบอร์ 11
17. เครื่องฉาบ
18. คีมจับเหล็ก
19. เครื่องทดสอบการรับแรงอัด
20. ส่วน
21. Hot plate
22. เครื่อง Data logger
23. ฮีตเตอร์ (Heatter)
24. สายเทอร์โมคัปเปิล
25. ไพรานอร์มิเตอร์

3.3 วิธีเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

เตรียมตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาแบบโฟมที่มีส่วนประกอบของเถ้าชานอ้อย โดยทำการศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอซแลนด์ด้วยเถ้าชานอ้อย ในสัดส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, และ 40 โดยน้ำหนัก และการแทนที่ทรายด้วยเถ้าชานอ้อยในสัดส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, และ 40 โดยน้ำหนัก เตรียมตัวอย่างทดสอบขนาด 7 cm x 7 cm x 7 cm โดยใช้แม่พิมพ์ ดังรูป 3.1 และเตรียมตัวอย่างในแม่พิมพ์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นถอดตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์ และจะได้ตัวอย่างที่มีขนาด 7 cm x 7 cm x 7 cm และทำการศึกษาค่าการหดตัว ส่วนค่าความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และค่าการรับแรงอัด จะทำการศึกษาสมบัติต่างๆ เมื่อตัวอย่างมีระยะเวลาที่ 14, 28, และ 60 วัน ซึ่งมีการอ้างอิงคุณสมบัติตามมาตรฐานอุตสาหกรรม หรือ มอก. 2601-2556 โดยแต่ละค่าการทดสอบ (ค่าการหดตัว ค่าความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และการรับแรงอัด) ในแต่ละสัดส่วน จะใช้คอนกรีตมวลเบา จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยขั้นตอนการศึกษาแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

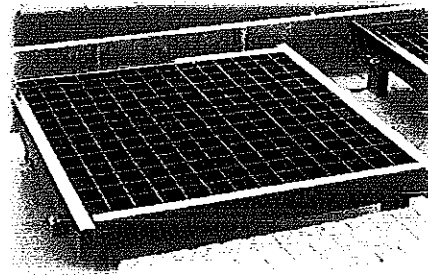
จ 10
897
.6
03498
1.562



25
สำนักหอสมุด

06 ส.ค. 2564

1034735



รูป 3.1 แม่พิมพ์ ขนาด 7 cm x 7 cm x 7 cm

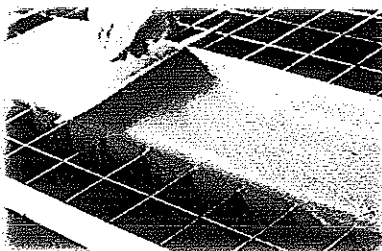
ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าขานอ้อยขนาด 7 cm x 7 cm x 7 cm

1. เตรียมตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาในแต่ละสัดส่วน โดยมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอซแลนค์ด้วยเถ้าขานอ้อยในสัดส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, และ 40 โดยน้ำหนัก
2. เตรียมตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาในแต่ละสัดส่วน โดยมีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อยในสัดส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, และ 40 โดยน้ำหนัก
3. ประกอบแม่พิมพ์และเคลือบด้วยน้ำมันที่ไม่ทำปฏิกิริยากับตัวอย่าง เพื่อป้องกันไม่ให้คอนกรีตติดแม่พิมพ์ และแกะออกง่าย
4. นำวัสดุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมในแต่ละสัดส่วน เทลงในถังเพื่อทำการผสมให้เข้ากันโดยการปั่นด้วยสว่าน [ดังรูป 3.2]



รูป 3.2 การผสมตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา

5. นำสัดส่วนที่ผสมเข้ากันแล้วเทลงในแม่แบบขนาด 7 cm x 7 cm x 7 cm รอการเซตตัวของเนื้อคอนกรีต แล้วตกแต่งผิวหน้าตัวอย่างให้เรียบ [ดังรูป 3.3]

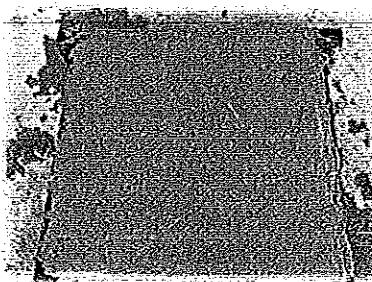


รูป 3.3 การตกแต่งผิวหน้าคอนกรีต

6. เมื่อตัวอย่างเริ่มแห้ง (ประมาณ 24 ชั่วโมง) ก็ถอดตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์ และนำไปทดสอบค่าการหดตัว
7. เมื่อตัวอย่างที่เตรียมมีระยะเวลา 7 วัน ก็จะนำไปทดสอบ ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และการรับแรงอัด และทดสอบสมบัติดังกล่าว เมื่อตัวอย่างมีระยะเวลาที่ 14 วัน 28 วัน และ 60 วัน

ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าขาน้อยขนาด 7.5 cm x 20 cm x 60 cm เพื่อนำไปทดสอบค่าการหน่วงความร้อน

1. เลือกวัสดุที่ดีที่สุดจากขั้นตอนที่ 1 ที่ผ่านเกณฑ์คุณสมบัติตามมาตรฐานอุตสาหกรรม หรือ มอก. 2601-2556 โดยวัสดุที่นำไปศึกษา
2. ประกอบแม่พิมพ์และเคลือบด้วยน้ำมันที่ไม่ทำปฏิกิริยากับตัวอย่าง เพื่อป้องกันไม่ให้คอนกรีตติดแม่พิมพ์ และแกะออกง่าย
3. เตรียมตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาในสัดส่วนร้อยละ 20 นำวัตถุดิบที่เตรียมไว้ตามสัดส่วน เทลงในถังทำการผสมให้เข้ากันโดยการปั่นด้วยสว่าน [ดังรูป 3.2]
4. นำส่วนผสมที่ผสมเข้ากันแล้วเทลงในแม่แบบขนาด 7.5cmx20cmx60cm รอกการเซตตัวของเนื้อคอนกรีต แล้วตกแต่งผิวหน้าตัวอย่างให้เรียบ [ดังรูป 3.4]

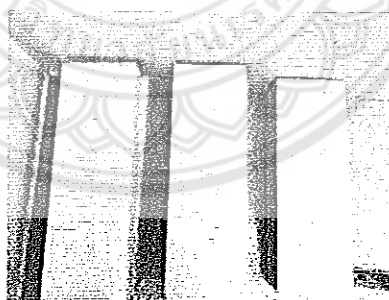


รูป 3.4 การตกแต่งผิวหน้าคอนกรีต

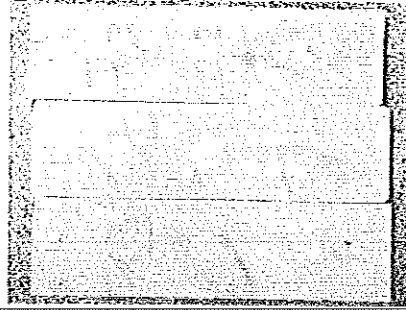
5. เมื่อตัวอย่างเริ่มแห้ง (ประมาณ 24 ชั่วโมง) ก็ทำการแกะออกจากแม่แบบ แล้วทิ้งไว้ ประมาณ 7 วัน
6. เมื่อครบ 7 วันแล้ว ก็นำไปทดสอบค่าการหน่วงความร้อน ในห้องทดสอบที่เตรียมไว้ และบันทึกค่าต่างๆ

ขั้นตอนที่ 3 การออกแบบอิฐมวลเบาหลุมรูปทรงกรวยเพื่อบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ

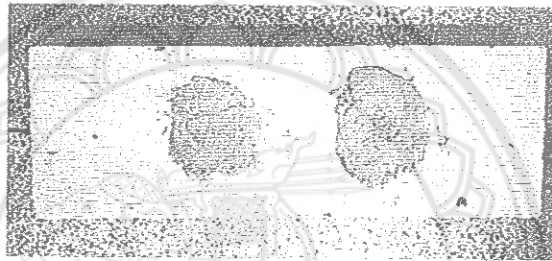
1. เลือกสัดส่วนที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 2 ที่ผ่านเกณฑ์คุณสมบัติตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ไปประยุกต์ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ
2. ทำการออกแบบอิฐมวลเบา มีขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร หนา 7.5 เซนติเมตร ดังรูป 3.5
3. ออกแบบหลุมอิฐมวลเบารูปทรงกรวย เส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร ลึก 3.5 เซนติเมตร จำนวน 2 หลุม 3 หลุม และ 4 หลุม ดังรูป 3.6
4. นำอิฐมวลเบาที่เจาะหลุมรูปทรงกรวยมาห่อหุ้มด้วยสารห่อหุ้มเพื่อบรรจุสารเปลี่ยนสถานะไว้ภายในหลุมดังรูป 3.6
5. นำปูนมาฉาบบริเวณห่อหุ้มสารเปลี่ยนสถานะดังรูป 3.7



รูป 3.5 เจาะอิฐมวลเบารูปทรงกรวยจำนวน 2 หลุม 3 หลุม และ 4 หลุม



รูป 3.6 อีฐมวลงเบทที่ห่อหุ้มด้วยสารห่อหุ้มสารเปลี่ยนสถานะ



รูป 3.7 ฉาบปูนบริเวณสารเปลี่ยนสารสถานะ

ขั้นตอนที่ 4 เตรียมห้องทดสอบและการทดสอบประสิทธิภาพของอีฐในเงื่อนไขต่างๆ

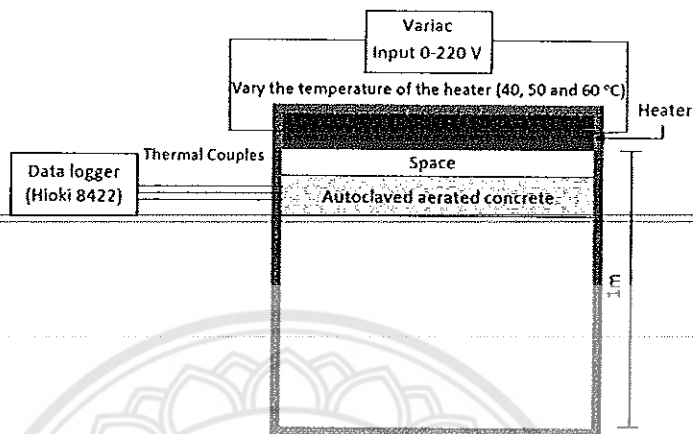
ออกแบบห้องทดสอบ โดยทำการจำลองให้เหมือนอาคาร มีขนาดของห้องทดสอบ กว้าง 60 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร ดังรูป 3.8 ซึ่งห้องทดสอบจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 คือ ส่วนด้านบน ในส่วนนี้จะทำหน้าที่ควบคุมความร้อนให้แก่อีฐมวลงเบทบริเวณผนังด้านบนที่ต้องการทดสอบ โดยทำการติดตั้งใส่สายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิ จำนวน 3 จุดคือ บริเวณปูนฉาบหลุมสารเปลี่ยนสถานะด้านบนของอีฐมวลงเบทก้อนที่ 1 และ 3 และบริเวณผนังด้านบนที่ไม่มีปูนฉาบของอีฐมวลงเบทก้อนที่ 2 เพื่อวัดอุณหภูมิผนังด้านบนของอีฐ ดังรูป 3.9

ส่วนที่ 2 คือ ส่วนกลาง ในส่วนนี้จะทำการเจาะรูจำนวน 2 รูด้านข้างของอีฐมวลงเบทแต่ละเงื่อนไขที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 1 โดยห่างกัน 2.5 เซนติเมตร ลึก 10 เซนติเมตร และทำการต่อสายเทอร์โมคัปเปิล เพื่อวัดอุณหภูมิภายในตัวอีฐมวลงเบท

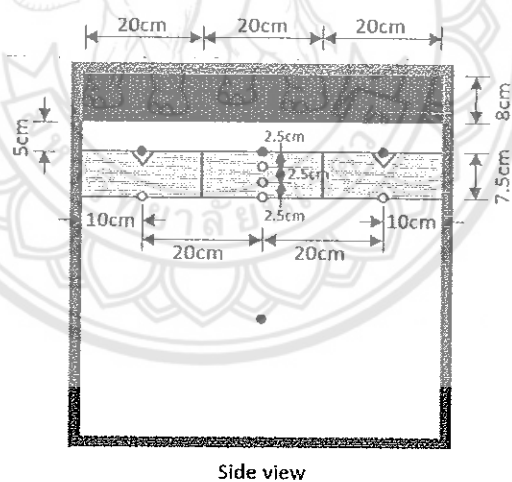
ส่วนที่ 3 คือ ส่วนด้านล่าง ในส่วนนี้จะวัดอุณหภูมิด้านล่างของอีฐมวลงเบท โดยต่อสายเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ 4 จุด คือบริเวณด้านล่างอีฐมวลงเบท ก้อนที่ 1 2 3 และวัดอุณหภูมิภายในห้อง ดังรูป 3.9

จากนั้น ทำการวัดอุณหภูมิบริเวณที่ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ทั้ง 3 ส่วน ดังรูป 3.9 เพื่อวัดอุณหภูมิและบันทึกผลที่บริเวณผนังด้านบน และผนังด้านในของผนัง และอุณหภูมิห้องทดสอบโดยจะควบคุมอุณหภูมิที่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส จากแหล่งกำเนิดความร้อน ซึ่งทำการวัดอุณหภูมิและ

เก็บผลการทดลองด้วยเครื่อง Data logger (Hioki LR8431-20) เพื่อนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์เปรียบเทียบหาประสิทธิภาพด้านความร้อนของอิฐมวลเบาที่ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไขต่างๆ



รูป 3.8 แผนภาพแสดงชุดการทดลองและอุปกรณ์ การทดสอบเพื่อตรวจสอบค่าการหน่วงเวลา (Time lag) และ ปัจจัยการลดลง (Decrement factor)



รูป 3.9 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิเพื่อทดสอบค่าความหน่วงของเวลา (Time lag) และ ปัจจัยการลดลง (Decrement factor)

ตาราง 3.1 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในห้องทดสอบ

สัญลักษณ์	ความหมาย
Tw	อุณหภูมิผนังภายนอกที่มีสารเปลี่ยนสถานะ
Tw,PCM	อุณหภูมิผนังภายนอก
Tw,25	อุณหภูมิผนังภายนอกลึกลับ 25 mm
Tw,50	อุณหภูมิผนังภายนอก 50 mm
Tr,PCM	อุณหภูมิผนังภายในที่มีสารเปลี่ยนสถานะ
Tr	อุณหภูมิผนังภายใน
TR	อุณหภูมิผนังภายในห้อง

ขั้นตอนที่ 5 หาเงื่อนไขที่เหมาะสมของอุณหภูมิที่นำมาใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ

นำผลการทดลองมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความร้อนของอุณหภูมิในเงื่อนไขต่างๆ เพื่อนำอุณหภูมิในเงื่อนไขที่ดีที่สุดมาทดสอบในสภาพอากาศจริง โดยหาค่าเฉลี่ยความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างผนังภายนอกและผนังภายใน เพื่อนำไปหาค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างผนังด้านบนและผนังด้านล่างจากสมการที่ 3.3 เพื่อนำไปคำนวณหาค่า การหน่วงความร้อน และ decrement factor

$$T_e = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} \quad (3.1)$$

$$T_i = \frac{T_6 + T_7 + T_8}{3} \quad (3.2)$$

$$\Delta T = (T_e - T_i) \quad (3.3)$$

เมื่อ	T_e	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยผนังด้านบน (องศาเซลเซียส)
	T_i	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยผนังด้านล่าง (องศาเซลเซียส)
	ΔT	คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

ขั้นตอนที่ 6 ทดสอบในสภาพอากาศจริง

- เตรียมอุณหภูมิที่ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด อุณหภูมิ และ อุณหภูมิ เบบางเชิงพาณิชย์

2. ทดสอบสภาวะการใช้งานจริงในสภาวะภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย โดยสร้างห้องทดสอบ 3 ห้องที่มีวัสดุแตกต่างกันประกอบด้วย อิฐมวลเบา อิฐมวลเชิงพาณิชย์ และอิฐมวลเบาที่ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด

2.1 ทำการออกแบบห้องทดสอบ ที่มีขนาดของห้องทดสอบ ดังต่อไปนี้

1. กว้าง 75 cm
2. ยาว 75 cm
3. สูง 90 cm

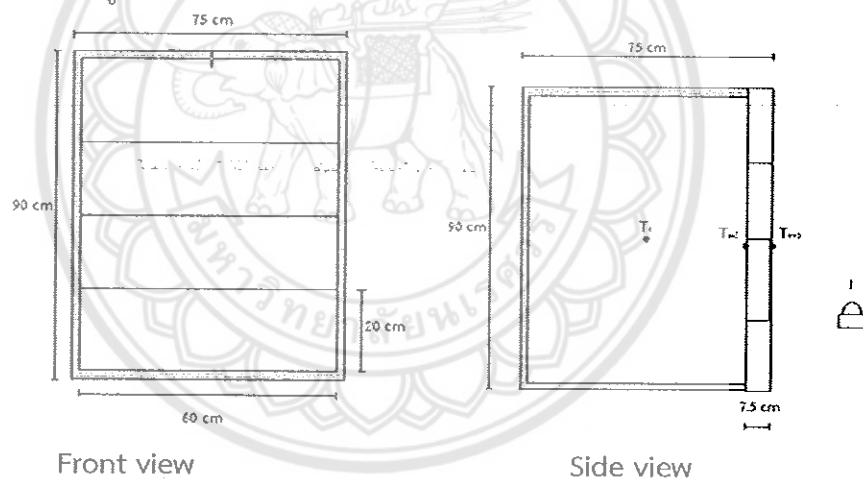
2.2 ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลที่ผนังอิฐผนังด้านนอก ด้านใน และภายในห้องทดสอบ

2.3 ติดตั้งไพรานอมิเตอร์ในบริเวณโล่งแจ้ง

2.4 ทำการทดสอบกลางวันแลกลางคืนตั้งแต่ 6:00 จนถึง 6:00 ของวันถัดไป

2.5 เก็บผลการทดลองโดยเครื่อง Data logger (Hioki LR8431-20) ทุก 5 นาที

2.6 เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผล



รูป 3.10 แผนภาพห้องทดสอบและติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิล

ตาราง 3.2 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในห้องทดสอบในสภาพอากาศจริง

สัญลักษณ์	ความหมาย
Two	อุณหภูมิผนังภายนอก
Two	อุณหภูมิผนังภายใน
Tr	อุณหภูมิผนังภายในห้อง
Tao	อุณหภูมิอากาศแวดล้อมภายนอก
I	ความเข้มแสงอาทิตย์

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล เชิงกายภาพ และสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของของเถาขานอ้อย โดยเถาขานอ้อยจะนำไปแทนปริมาณปูนซีเมนต์ปอซแลนด์ในสัดส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนัก และการแทนที่ทรายด้วยเถาขานอ้อยในสัดส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, และ 40 โดยน้ำหนัก โดยจะทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เช่น การหดตัว ความหนาแน่น ร้อยละการดูดซึมน้ำ และการรับแรงอัด ตามระยะเวลาที่ทำการทดสอบคือ 7 วัน 14 วัน 28 วัน และ 60 วัน เพื่อหาสัดส่วนที่ดีที่สุดที่ผ่านเกณฑ์คุณสมบัติตามมาตรฐานอุตสาหกรรม หรือ มอก. 2601-2556 เพื่อนำมาศึกษาสมบัติทางความร้อนต่อไป

ผลการทดลองสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอซแลนด์ด้วยเถาขานอ้อย ร้อยละการหดตัว

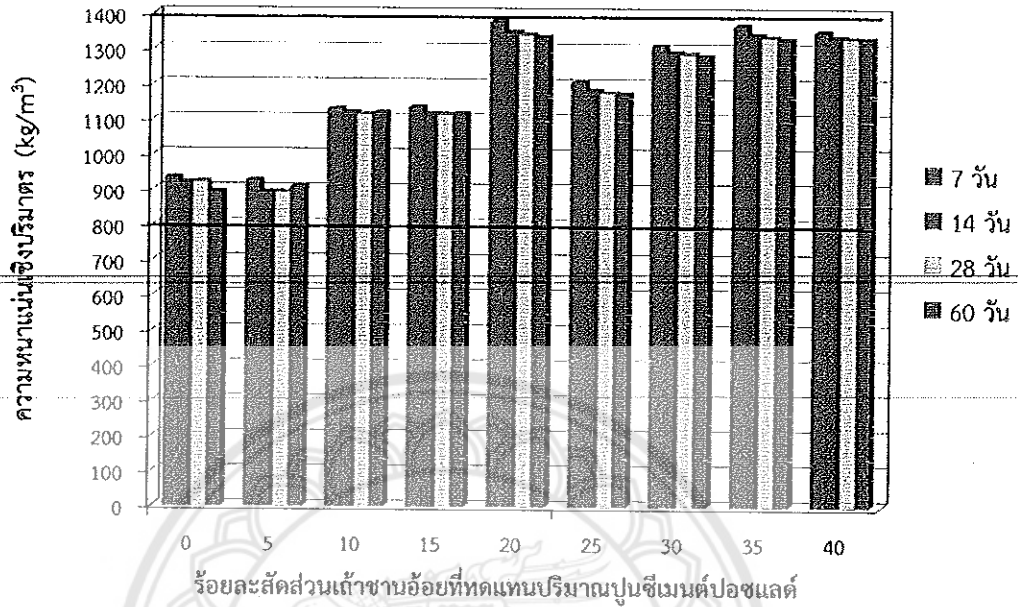
จากการทดสอบคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนประกอบของเถาขานอ้อยในแต่ละสัดส่วน โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบร้อยละการหดตัวที่ระยะเวลาทั้งหมด 60 วัน พบว่า ที่ระยะเวลาทำการทดสอบ 7 วัน - 60 วัน คอนกรีตมวลเบาเชิงพาณิชย์หรือคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนประกอบของเถาขานอ้อยร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละการหดตัวอยู่ที่ 0.338 - 5.538 คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนประกอบของเถาขานอ้อยร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละการหดตัวอยู่ที่ 0.447 - 6.493 คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนประกอบของเถาขานอ้อยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละการหดตัวอยู่ที่ 0.150 - 2.482 คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนประกอบของเถาขานอ้อยร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละการหดตัวอยู่ที่ 0.686 - 3.747 คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนประกอบของเถาขานอ้อยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละการหดตัวอยู่ที่ 0.164 - 2.001 คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนประกอบของเถาขานอ้อยร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละการหดตัวอยู่ที่ 0.129 - 4.874 คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนประกอบของเถาขานอ้อยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละการหดตัวอยู่ที่ 0.203 - 0.769 คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนประกอบของเถาขานอ้อยร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละการหดตัวอยู่ที่ 0.658 - 3.710 และคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนประกอบของเถาขานอ้อยร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละการหดตัวอยู่ที่ 1.327 - 2.198 ดังแสดงในตาราง 4.1

ตาราง 4.1 ร้อยละการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนประกอบของเถ้าชานอ้อยที่สัดส่วนต่างๆ

ระยะเวลา (วัน)	ร้อยละการหดตัวที่สัดส่วนต่างๆ								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
7	0.338	0.447	0.150	0.686	0.164	0.129	0.203	0.658	1.327
14	1.033	0.996	0.466	0.721	0.196	0.566	0.230	0.904	1.539
28	1.631	1.810	0.922	1.570	0.883	1.055	0.769	1.503	2.198
60	5.538	6.493	2.482	3.747	2.001	4.874	2.108	3.710	2.952

ความหนาแน่นเชิงปริมาตร

ความหนาแน่นเชิงปริมาตรที่ระยะเวลาทำการทดสอบ 7 วัน 14 วัน 28 วัน และ 60 วัน ของคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อยในสัดส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, และ 40 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูป 4.1 และตาราง 4.2 พบว่า คอนกรีตมวลเบาที่ไม่มีส่วนประกอบของเถ้าชานอ้อยหรือคอนกรีตมวลเบาเชิงพาณิชย์มีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรอยู่ที่ 934, 918, 922 และ 894 ซึ่งมีแนวโน้มลดลง เมื่อระยะเวลาทดสอบเพิ่มขึ้นที่ 7 วัน 14 วัน 28 วัน และ 60 วัน สำหรับคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนประกอบของเถ้าชานอ้อยในสัดส่วนอื่นๆ จะมีแนวโน้มที่คล้ายกัน โดยจะเห็นว่าคอนกรีตมวลเบาแต่ละสัดส่วนจะมีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรอยู่ระหว่าง 800 - 1400 kg/m³ ซึ่งมีคุณสมบัติอยู่ตามเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) ประเภท C9 - C14



รูป 4.1 ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของคอนกรีตมวลเบาที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเถ้าขาน้อยในสัดส่วนต่างๆ

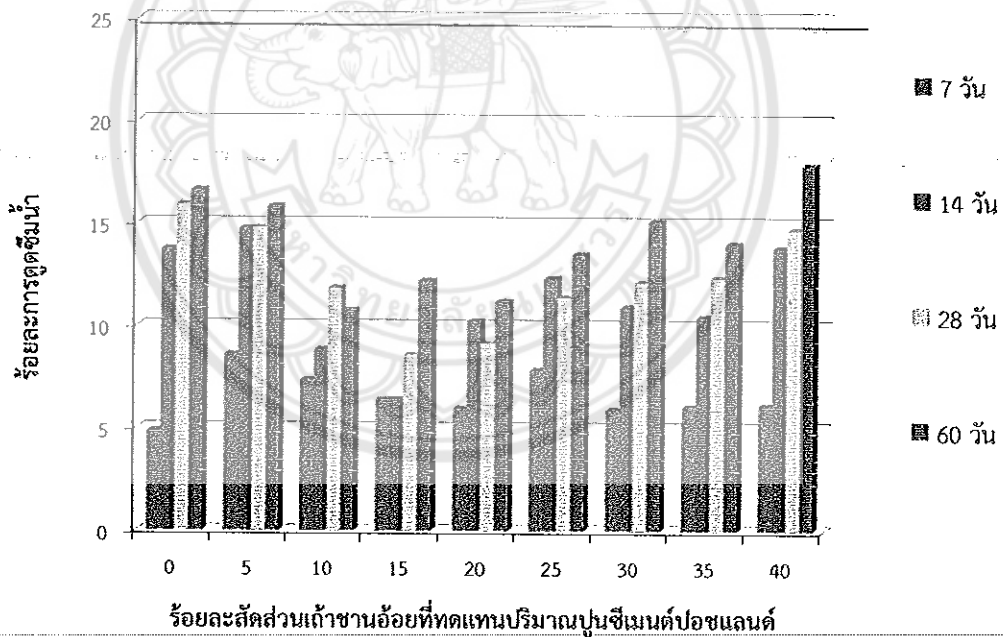
ตาราง 4.2 ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าขาน้อยในสัดส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาการทดสอบที่ต่างกัน

ร้อยละเถ้าขาน้อย	ความหนาแน่นที่ระยะเวลาต่างๆ (kg/m ³)			
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน
0	934	918	922	894
5	926	893	893	910
10	1131	1121	1116	1119
15	1135	1115	1116	1117
20	1380	1349	1343	1336
25	1207	1184	1176	1173
30	1311	1293	1288	1282
35	1369	1343	1336	1329
40	1352	1336	1334	1332

หมายเหตุ : สัดส่วนร้อยละ 0 - 40 หมายถึง ร้อยละสัดส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าขาน้อยที่เข้าไปแทนปริมาณปูนซีเมนต์ปอซแลนด์

ร้อยละการดูดซึมน้ำ

จากรูป 4.2 และ ตาราง 4.3 แสดงร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาแต่ละสัดส่วน พบว่าที่ระยะเวลาการทดสอบ 7 วัน คอนกรีตมวลเบาที่มีร้อยละการดูดซึมน้ำมากที่สุดคือ คอนกรีตมวลเบาที่ส่วนประกอบของเถ้าชานอ้อยร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำอยู่ที่ 8.60 และคอนกรีตมวลเบาที่มีร้อยละการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดคือ คอนกรีตมวลเบาเชิงพาณิชย์หรือคอนกรีต ซึ่งมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำอยู่ที่ 4.89 และที่ระยะเวลาการทดสอบ 14, 28 และ 60 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีร้อยละการดูดซึมน้ำมากที่สุดคือ คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนประกอบของเถ้าชานอ้อยร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำอยู่ที่ 14.75, 14.80 และ 15.83 ตามลำดับ และสัดส่วนที่มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดคือ คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนประกอบของเถ้าชานอ้อยร้อยละ 15, 15, และ 10 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำอยู่ที่ 6.43, 8.59 และ 10.77 ที่ระยะเวลาการทดสอบ 14, 28 และ 60 วันตามลำดับ โดยจะเห็นว่าคอนกรีตมวลเบาแต่ละสัดส่วนมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 25 ซึ่งคอนกรีตมวลเบาทุกสัดส่วนมีคุณสมบัติผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556)



รูป 4.2 ร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อยในสัดส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาการทดสอบที่ต่างกัน

ตาราง 4.3 ร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อยในสัดส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาการทดสอบที่ต่างกัน

ร้อยละสัดส่วน เถ้าชานอ้อย	ร้อยละการดูดซึมน้ำที่ระยะเวลาต่างๆ			
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน
0	4.89	13.75	15.94	16.62
5	8.60	14.75	14.80	15.83
10	7.38	8.84	11.85	10.77
15	6.42	6.43	8.59	12.23
20	6.00	10.22	9.14	11.21
25	7.85	12.34	11.40	13.49
30	5.94	10.91	12.12	15.09
35	6.08	10.44	12.36	14.01
40	6.13	13.81	14.70	17.84

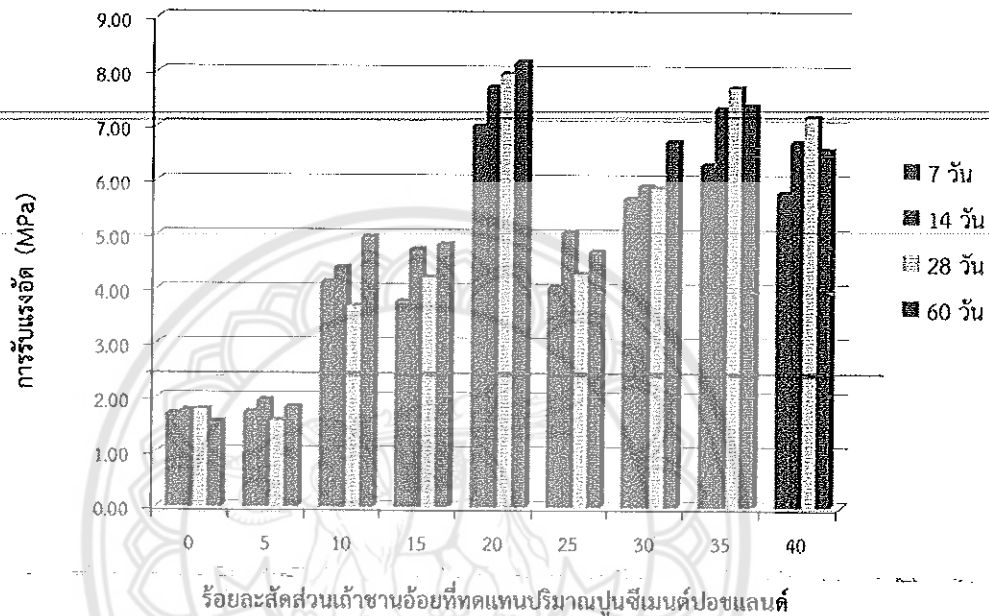
หมายเหตุ : สัดส่วนร้อยละ 0 - 40 หมายถึง ร้อยละสัดส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าชานอ้อยที่เข้าไปแทนปริมาณปูนซีเมนต์ปอซแลนด์

การรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา

จากรูป 4.3 และตาราง 4.4 แสดงการรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อยในแต่ละสัดส่วน พบว่า คอนกรีตมวลเบาที่ระยะเวลาทดสอบ 7, 14, 28, และ 60 วัน คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อยร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก หรือคอนกรีตมวลเบาเชิงพาณิชย์มีค่าการรับแรงอัดต่ำที่สุด โดยมีค่าการรับแรงอัดอยู่ที่ 1.72, 1.78, 1.80 และ 1.57 MPa ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ประเภท C9 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 801 - 900 kg/m³ ที่ระยะเวลาทดสอบ 7, 14, 28, และ 60 วัน [ดังตาราง 4.2] แต่เนื่องจากค่าการรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อยร้อยละ 0-โดยน้ำหนัก มีค่าต่ำกว่า 2.5 MPa ทำให้สัดส่วนนี้มีคุณสมบัติไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556)

ส่วนคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าการรับแรงมากที่สุดในระยะเวลาทดสอบ 7, 14, 28 และ 60 วัน คือ คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 7.01, 7.73, 7.97 และ 8.18 MPa โดยมีคุณสมบัติตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ชนิด C14 ซึ่งต้องมีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรอยู่ระหว่าง 1201 - 1400 kg/m³ และมีค่าการรับแรงอัดมากกว่า 5.0 MPa ที่ระยะเวลาทดสอบ 7 - 60 วัน [ดังตาราง 4.2] ส่วนคอนกรีตมวลเบาที่มีคุณสมบัติตามมาตรฐานอุตสาหกรรมชนิด C12 ต้องมี

ค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง $1001 - 1200 \text{ kg/m}^3$ [ดังรูป 4.1] และมีค่าการรับแรงอัดมากกว่า 2.5 MPa ที่ระยะเวลาทดสอบ 7- 60 วัน โดยคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าการรับแรงอัดสูงที่สุด คือ คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนประกอบของเถ้าขานอ้อยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าการรับแรงอัดอยู่ที่ 4.97 MPa



รูป 4.3 การรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าขานอ้อยในสัดส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาการทดสอบที่ต่างกัน

สำหรับผลการทดสอบของอิฐมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าขานอ้อย ที่นำมาทดแทนทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0 ,5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนัก ในระยะเวลาที่ทำการทดสอบคือ 7 , 14 , 28 และ 60 วัน เพื่อหาสัดส่วนที่ดีที่สุดที่ผ่านเกณฑ์ตามคุณสมบัติตามมาตรฐาน (มอก.2601-2556)

ผลการทดลองสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาที่มีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อย ร้อยละการหดตัว

จากการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาสามารถสรุปเป็นผลการทดสอบได้ดังนี้

จากตาราง 4.5 แสดงค่าร้อยละการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาที่สัดส่วนต่างๆที่ระยะเวลาที่ระยะเวลา 7, 14, 28 และ 60 วันโดยแสดงดังตาราง 4.8 พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่ระยะเวลา 7 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีการหดตัวน้อยที่สุด คือ สัดส่วน 25 มีค่าการหดตัวร้อยละ 0.08 และสัดส่วนที่มีค่าการหดตัวมากที่สุด พบในสัดส่วน 30 มีค่าร้อยละการหดตัว 0.48

คอนกรีตมวลเบาที่ระยะเวลา 14 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีการหดตัวน้อยที่สุด คือ สัดส่วน 25 มีค่าการหดตัวร้อยละ 0.13 และสัดส่วนที่มีค่าการหดตัวมากที่สุด พบในสัดส่วน 0 มีค่าร้อยละการหดตัว 1.03

คอนกรีตมวลเบาที่ระยะเวลา 28 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีการหดตัวน้อยที่สุด คือ สัดส่วน 25 มีค่าการหดตัวร้อยละ 0.01 และสัดส่วนที่มีค่าการหดตัวมากที่สุด พบในสัดส่วน 0 มีค่าร้อยละการหดตัว 1.63

คอนกรีตมวลเบาที่ระยะเวลา 60 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีการหดตัวน้อยที่สุด คือ สัดส่วน 25 มีค่าการหดตัวร้อยละ 0.25 และสัดส่วนที่มีค่าการหดตัวมากที่สุด พบในสัดส่วน 0 มีค่าร้อยละการหดตัว 5.54

ตาราง 4.4 การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาในสัดส่วนต่างๆ

ร้อยละเก้าชานอ้อย	ค่าร้อยละการหดตัว			
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน
0	0.34	1.03	1.63	5.54
5	0.21	0.80	0.26	0.58
10	0.10	0.27	0.29	0.91
15	0.27	0.50	0.19	0.91
20	0.23	0.52	0.16	0.37
25	0.08	0.13	0.01	0.36
30	0.48	0.55	0.22	0.75
35	0.33	0.76	0.15	0.86
40	0.19	0.57	0.21	0.69

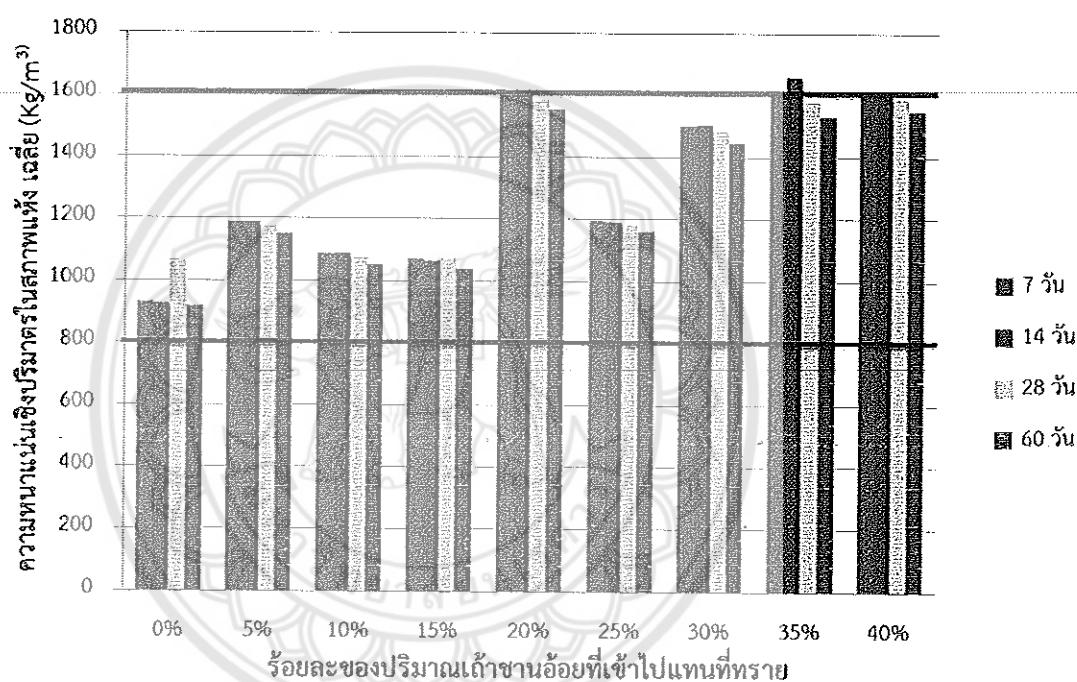
หมายเหตุ : สัดส่วนร้อยละ 0 - 40 หมายถึง ร้อยละสัดส่วนโดยน้ำหนักของเก้าชานอ้อยที่เข้าไปแทนปริมาณทราย

ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร

จากการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาสามารถสรุปเป็นผลการทดสอบได้ดังนี้ รูป 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเก้าชานอ้อยกับความหนาแน่นที่ระยะเวลา 7,14,28 และ 60 วันโดยแสดงผลควบคู่กับตาราง 4.6 พบว่า เมื่อปริมาณเก้าชานอ้อยเพิ่มมาก

ขึ้นจะทำให้คอนกรีตมวลเบา มีน้ำหนักมากและความหนาแน่นก็จะมีค่ามากขึ้น และยังระยะเวลาเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นก็จะมีค่าลดลง โดยแบ่งเกณฑ์ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.2601-2556) ได้ดังนี้

C9	ค่าความหนาแน่น	801 – 900	ได้แก่สัดส่วน	0
C12	ค่าความหนาแน่น	1001 – 1200	ได้แก่สัดส่วน	5
C14	ค่าความหนาแน่น	1201 – 1400	ได้แก่สัดส่วน	10, 15, 25
C16	ค่าความหนาแน่น	1401 – 1601	ได้แก่สัดส่วน	20, 30, 35, 40



รูป 4.4 ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมถ้าขานอ้อย ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ระยะเวลา 7 14 28 และ 60 วัน

ร้อยละการดูดซึมน้ำ

รูป 4.5 แสดงร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่สัดส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลา 7, 14, 28 และ 60 วัน โดยแสดงผลควบคู่กับตาราง 4.7 พบว่า

คอนกรีตมวลเบาที่ระยะเวลา 7 วัน มีร้อยละการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง 4.0 – 13.0 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของปริมาณทรายมีผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา โดยสัดส่วน 25 มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 12.2 และค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าน้อยที่สุด พบที่ตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาสัดส่วน 20 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.4

คอนกรีตมวลเบาที่ระยะเวลา 14 วัน มีร้อยละการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง 4.0 – 14.0 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของปริมาณทรายมีผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาโดยสัดส่วน 0 มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 13.7 และค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าน้อยที่สุด พบที่ตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาสัดส่วน 20 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.1

คอนกรีตมวลเบาที่ระยะเวลา 28 วัน มีร้อยละการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง 5.0 – 14.0 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของปริมาณทรายมีผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาโดยสัดส่วน 0 มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 13.0 และค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าน้อยที่สุด พบที่ตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาสัดส่วน 20 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.1

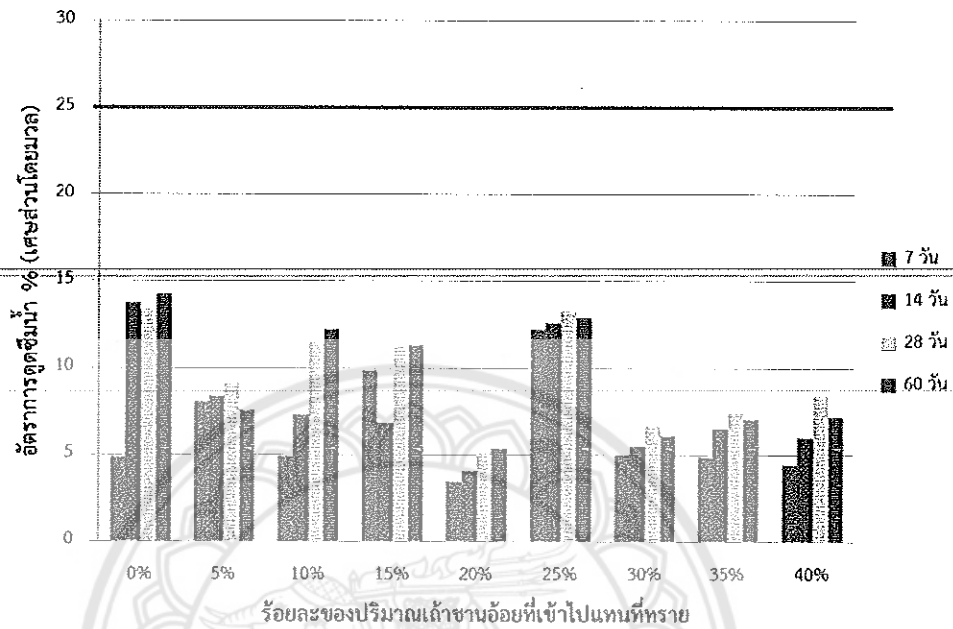
คอนกรีตมวลเบาที่ระยะเวลา 60 วัน มีร้อยละการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง 5.0 – 15.0 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของปริมาณทรายมีผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาโดยสัดส่วน 0 มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 14.2 และค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าน้อยที่สุด พบที่ตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาสัดส่วน 20 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.4

ร้อยละการดูดซึมน้ำของสัดส่วน 0 ที่ระยะเวลา 7, 14, 28 และ 60 วัน มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา เท่ากับ 4.8, 13.7, 13.3 และ 14.2 ตามลำดับโดยมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกับสัดส่วนอื่นๆ สัดส่วนร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่ได้มาตรฐาน มอก. 2601-2556 คอนกรีตมวลเบาที่กำหนดไว้จะต้องมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาไม่เกินร้อยละ 23 จากรูป 4.5 พบว่า ไม่มีสัดส่วนใดที่ไม่ผ่านมาตรฐาน

ตาราง 4.5 ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาในอัตราส่วนต่างๆ

ร้อยละเถ้าขาน้อย	ความหนาแน่น (kg/m^3)			
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน
0	933	924	1067	919
5	1190	1191	1178	1153
10	1086	1091	1074	1053
15	1072	1065	1072	1041
20	1598	1600	1585	1556
25	1195	1193	1181	1162
30	1500	1506	1484	1450
35	1601	1660	1579	1533
40	1602	1608	1589	1552

หมายเหตุ : สัดส่วนร้อยละ 0 - 40 หมายถึง ร้อยละสัดส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าขาน้อยที่เข้าไปแทนปริมาณทราย



รูป 4.5 ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตเบาที่ผสมเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนต่างๆ ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลา 7 14 28 และ 60 วัน

ตาราง 4.6 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาในอัตราส่วนต่างๆ

ร้อยละเถ้าขานอ้อย	ร้อยละอัตราการดูดซึมน้ำ			
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน
0	4.8	13.7	13.3	14.2
5	8.0	8.3	9.1	7.5
10	4.9	7.2	11.4	12.2
15	9.8	6.8	11.2	11.3
20	3.4	4.0	5.1	5.3
25	12.2	12.6	13.2	12.9
30	5.0	5.4	6.6	6.0
35	4.8	6.5	7.3	7.0
40	8.0	8.3	9.1	7.5

หมายเหตุ : สัดส่วนร้อยละ 0 - 40 หมายถึง ร้อยละสัดส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าขานอ้อยที่เข้าไปแทนปริมาณทราย

การรับแรงอัด

จากการทดสอบการรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาสามารถสรุปเป็นผลการทดสอบได้ดังนี้

รูป 4.6 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่มีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของปริมาณเถ้าขานอ้อย ที่ระยะเวลา 7, 14, 28 และ 60 วันโดยแสดงผลควบคู่กับตาราง 4.4 พบว่า คอนกรีตมวลเบาที่ระยะเวลา 7 วัน คอนกรีตมวลเบาสัดส่วน 40 มีค่าการรับแรงอัดมากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 16.76 MPa และคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าการรับแรงอัดน้อยที่สุด พบในสัดส่วน 0 มีค่าเท่ากับ 1.722 MPa

คอนกรีตมวลเบาที่ระยะเวลา 14 วัน คอนกรีตมวลเบาสัดส่วน 35 มีค่าการรับแรงอัดมากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 20.59 MPa และคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าการรับแรงอัดน้อยที่สุด พบในสัดส่วน 0 มีค่าเท่ากับ 1.781 MPa

คอนกรีตมวลเบาที่ระยะเวลา 28 วัน คอนกรีตมวลเบาสัดส่วน 35 มีค่าการรับแรงอัดมากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 19.42 MPa และคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าการรับแรงอัดน้อยที่สุด พบในสัดส่วน 0 มีค่าเท่ากับ 1.798 MPa

คอนกรีตมวลเบาที่ระยะเวลา 60 วัน คอนกรีตมวลเบาสัดส่วน 40 มีค่าการรับแรงอัดมากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 18.46 MPa และคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าการรับแรงอัดน้อยที่สุด พบในสัดส่วน 0 มีค่าเท่ากับ 1.57 MPa

ตาราง 4.7 ค่าการรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเถ้าขานอ้อยในสัดส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลาการทดสอบที่ต่างกัน

ร้อยละเถ้า ขานอ้อย	ค่าการรับแรงอัดที่ระยะเวลากัน (MPa)			
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน
0	1.72	1.78	1.80	1.57
5	1.75	1.97	1.59	1.84
10	4.14	4.41	3.70	4.97
15	3.78	4.74	4.22	4.83
20	7.01	7.73	7.97	8.18
25	4.04	5.06	4.29	4.70
30	5.67	5.91	5.87	6.72
35	6.30	7.34	7.72	7.38
40	5.78	6.72	7.19	6.58

หมายเหตุ : สัดส่วนร้อยละ 0 - 40 หมายถึง ร้อยละสัดส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าขานอ้อยที่เข้าไปแทนปริมาณปูนซีเมนต์ปอซแลนด์

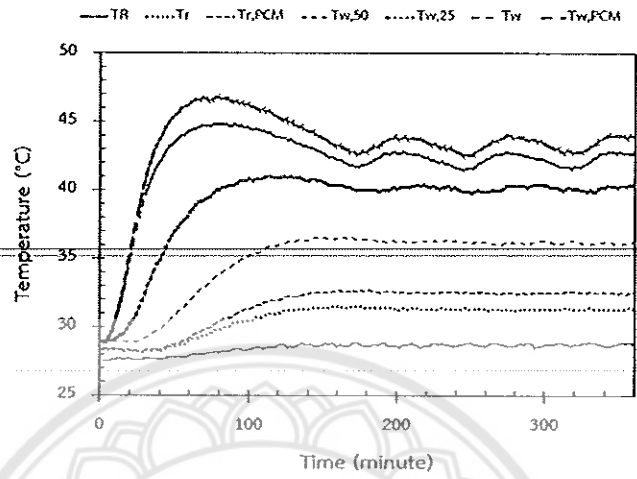
ผลจากการศึกษาการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขาน้อยในสัดส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะนำไปปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อน โดยการประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะร่วมกับคอนกรีตมวลเบาที่มีการออกแบบทรงกรวยเพื่อบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ โดยออกแบบรูปทรงกรวยจำนวน 2 หลุม 3 หลุม และ 4 หลุม เพื่อบรรจุสารเปลี่ยนสถานะบนผิวของอิฐมวลเบา โดยการศึกษาอุณหภูมิห้องทดสอบที่ควบคุมอุณหภูมิจากแหล่งความร้อน 40°C 50°C และ 60°C ซึ่งมีการศึกษาอุณหภูมิของอิฐมวลเบาที่ตำแหน่งความหนาต่างๆ และอุณหภูมิห้องทดสอบ เพื่อได้เงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อนำไปทดสอบสภาพอากาศจริง

ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนในห้องจำลอง

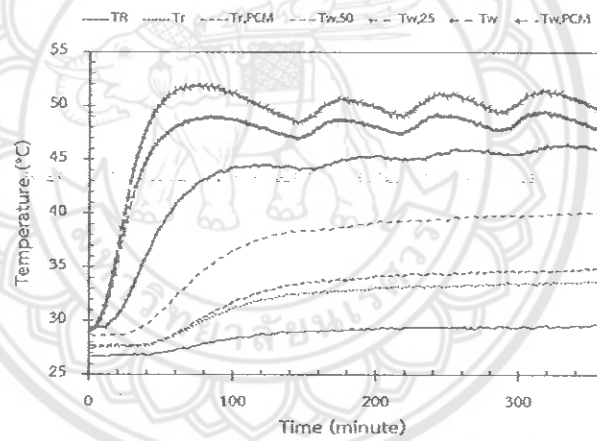
อิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของอิฐมวลเบา ที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม โดยมีการทดสอบในห้องทดลอง ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C 50°C และ 60°C เป็นระยะเวลา 360 นาที โดยมีการเก็บผลอุณหภูมิที่ความหนาต่างๆคือ ผนังภายนอก (T_w) ผนังภายนอกตำแหน่งที่มีสารเปลี่ยนสถานะ ที่ความหนา 0 mm ($T_{w,PCM}$) ที่ความหนา 25 mm ($T_{w,25}$) ที่ความหนา 50 mm ($T_{w,50}$) ผนังภายในที่ความหนา (T_i) ผนังภายในตำแหน่งที่มีสารเปลี่ยนสถานะ ที่ความหนา 75 mm ($T_{i,PCM}$) และอุณหภูมิห้อง (T_R) เมื่อพิจารณาอุณหภูมิสภาพแวดล้อมห้องทดสอบที่ 40°C พบว่าค่าอุณหภูมิเริ่มต้น ที่ผนังภายนอก (T_w) ที่ความหนา 0 mm จะมีค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงเวลาประมาณ 0-100 นาที หลังจากนั้นอุณหภูมิจะคงที่เมื่อเวลาผ่านไปเป็นเวลาประมาณ 240-360 นาที ดังแสดงในรูป 4.7 สำหรับตำแหน่งอุณหภูมิที่ความหนา 0 mm ที่มีสารเปลี่ยนสถานะ 25 mm 50 mm 75 mm ที่มีสารเปลี่ยนสถานะและไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ และอุณหภูมิห้องมีลักษณะแนวโน้มที่คล้าย ๆ กับตำแหน่งภายนอกที่ 0 mm โดยอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงประมาณ 240-360 นาที ที่ตำแหน่ง $x=0$ mm $x_{PCM}=0$ mm $x=25$ mm $x=50$ mm $x_{PCM}=75$ mm และ $x=75$ mm มีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 43.3°C 42.0°C 39.2°C 35.0°C 31.7 และ 30.7°C ตามลำดับ และมีอุณหภูมิห้องเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 28.5°C ดังตาราง 4.9

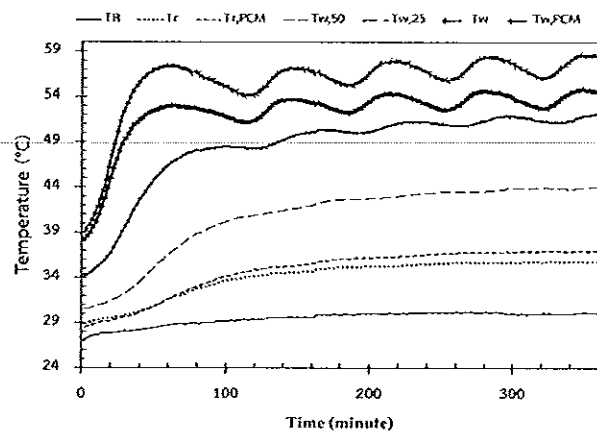
จากการทดลองพบว่าความหนาที่มีผลต่ออุณหภูมิของผนังเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิของอิฐมวลเบาแบบมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขอุณหภูมิทดสอบ 50°C และ 60°C สังเกตได้ว่าแนวโน้มของอุณหภูมิผนังที่ตำแหน่งต่างๆ และ อุณหภูมิห้อง มีแนวโน้มคล้ายกับเงื่อนไขห้องจำลองที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C ดังรูป 4.8 และ 4.9 และพบว่าที่อุณหภูมิควบคุมที่ 50°C ที่ช่วงเวลาประมาณ 240-360 นาที มีค่าอุณหภูมิผนังเฉลี่ยที่ตำแหน่ง $x=0$ mm $x_{PCM}=0$ mm $x=25$ mm $x=50$ mm $x_{PCM}=75$ mm และ $x=75$ mm มีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 48.9°C 46.8°C 43.1°C 37.0°C 32.6°C และ 31.8°C ตามลำดับ และอุณหภูมิห้องเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 29.0°C และพบว่าที่อุณหภูมิควบคุมที่ 60°C ที่ช่วงเวลาประมาณ 240-360 นาที มีค่าอุณหภูมิผนังเฉลี่ยที่ตำแหน่ง $x=0$ mm $x_{PCM}=0$ mm $x=25$ mm $x=50$ mm $x_{PCM}=75$ mm และ $x=75$ mm มีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 55.7°C 52.3°C 48.6°C 40.8°C 34.8°C และ 34.1°C ตามลำดับ และอุณหภูมิห้องเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 30.0°C ดังตาราง 4.9



รูป 4.7 อุณหภูมิของ PCM 2 หลุม ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 40°C



รูป 4.8 อุณหภูมิของ PCM 2 หลุม ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 50°C

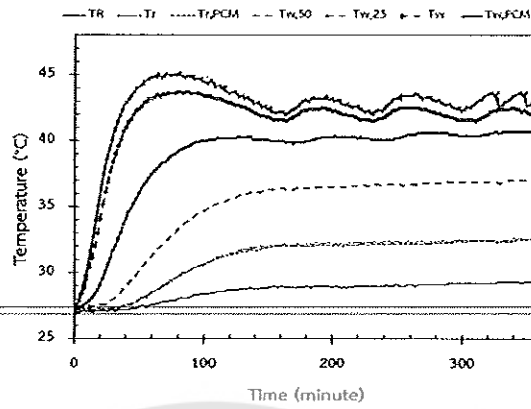


รูป 4.9 อุณหภูมิของ PCM 2 หลุม ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 60°C

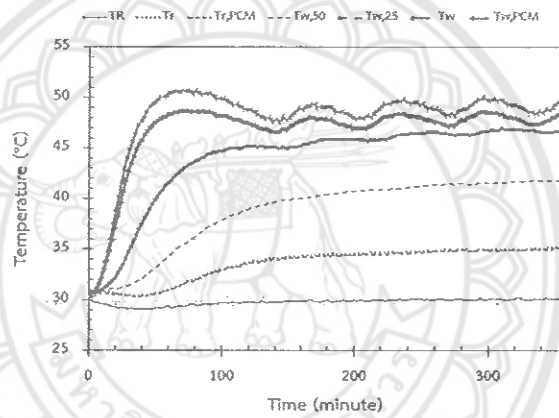
อิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะจำนวน 3 หลุม

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของอิฐมวลเบาแบบ ที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ จำนวน 3 หลุม โดยมีการทดสอบในห้องทดลอง ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C 50°C และ 60°C เป็นระยะเวลา 360 นาที โดยมีการเก็บผลอุณหภูมิที่ความหนาต่างๆคือ ผนังภายนอก (T_w) ผนังภายนอก ตำแหน่งที่มีสารเปลี่ยนสถานะ ที่ความหนา 0 mm ($T_{w,PCM}$) ที่ความหนา 25 mm ($T_{w,25}$) ที่ความหนา 50 mm ($T_{w,50}$) ผนังภายในที่ความหนา (T_i) ผนังภายในตำแหน่งที่มีสารเปลี่ยนสถานะ ที่ความหนา 75 mm ($T_{i,PCM}$) และอุณหภูมิห้อง (T_r) เมื่อพิจารณาอุณหภูมิสภาพแวดล้อมห้องทดสอบที่ 40°C พบว่าค่าอุณหภูมิเริ่มต้น ที่ผนังภายนอก (T_w) ที่ความหนา 0 mm จะมีค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงเวลาประมาณ 0-100 นาที หลังจากนั้นอุณหภูมิจะคงที่เมื่อเวลาผ่านไปเป็นเวลาประมาณ 240-360 นาทีดังแสดงในรูป 4.10 สำหรับตำแหน่งอุณหภูมิที่ความหนา 0 mm ที่มีสารเปลี่ยนสถานะ 25 mm 50 mm 75 mm ที่มีสารเปลี่ยนสถานะและไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ และอุณหภูมิห้องมีแนวโน้มที่คล้าย ๆ กับตำแหน่งภายนอกที่ 0 mm โดยอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงประมาณ 240-360 นาที ที่ตำแหน่ง $x=0$ mm $x_{PCM}=0$ mm $x=25$ mm $x=50$ mm $x_{PCM}=75$ mm และ $x=75$ mm มีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 42.6°C 42.4°C 38.6°C 34.6°C 30.9°C และ 30.3°C ตามลำดับและมีอุณหภูมิห้องเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 29.1°C ดังตาราง 4.9

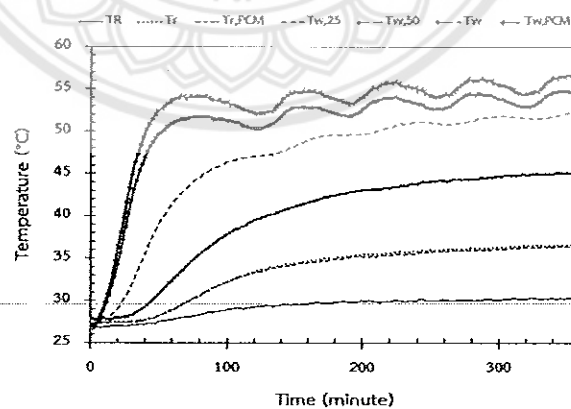
จากการทดลองพบว่าความหนาที่มีผลต่ออุณหภูมิของผนังเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิของอิฐมวลเบาที่มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขที่อุณหภูมิทดสอบ 50°C และ 60°C สังเกตได้ว่าแนวโน้มของอุณหภูมิผนังที่ตำแหน่งต่างๆ และ อุณหภูมิห้อง มีแนวโน้มคล้ายกับเงื่อนไขห้องจำลองที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C ดังรูป 4.11 และ 4.12 และพบว่าที่อุณหภูมิควบคุมที่ 50°C ที่ช่วงเวลาประมาณ 240-360 นาที มีค่าอุณหภูมิผนังเฉลี่ยที่ตำแหน่ง $x=0$ mm $x_{PCM}=0$ mm $x=25$ mm $x=50$ mm $x_{PCM}=75$ mm และ $x=75$ mm มีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 48.1°C 48.0°C 44.3°C 39.1°C 33.7°C และ 33.5°C ตามลำดับ และอุณหภูมิห้องเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 30.0°C และพบว่าที่อุณหภูมิควบคุมที่ 60°C ที่ช่วงเวลาประมาณ 240-360 นาที มีค่าอุณหภูมิผนังเฉลี่ยที่ตำแหน่ง $x=0$ mm $x_{PCM}=0$ mm $x=25$ mm $x=50$ mm $x_{PCM}=75$ mm และ $x=75$ mm มีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 52.5°C 51.8°C 46.7°C 40.0°C 33.5°C และ 33.0°C ตามลำดับ และอุณหภูมิห้องเฉลี่ยมีค่า 30.1°C ดังตาราง 4.9



รูป 4.10 อุณหภูมิของเบ้าที่มี PCM 3 หลุม ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 40°C



รูป 4.11 อุณหภูมิของเบ้าที่มี PCM 3 หลุม ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 50°C

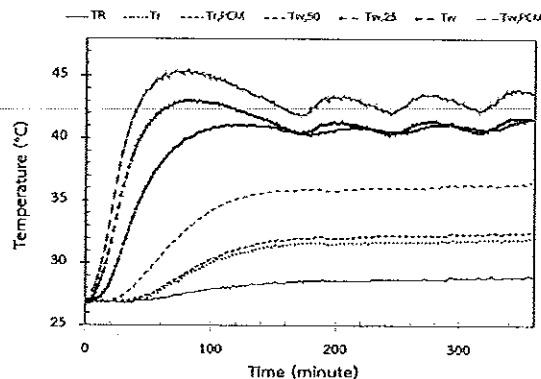


รูป 4.12 อุณหภูมิของเบ้าที่มี PCM 3 หลุม ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 60°C

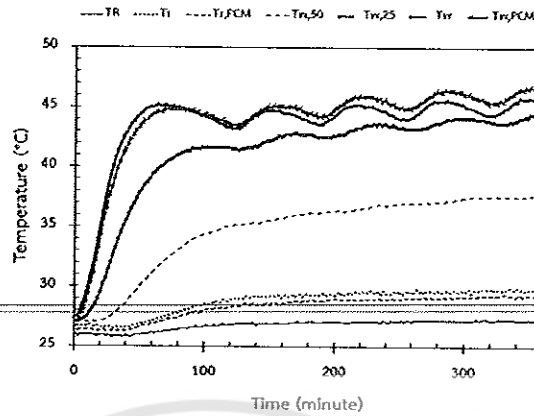
อิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะ 4 หลุม

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของอิฐมวลเบา ที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ จำนวน 4 หลุม โดยมีการทดสอบในห้องทดลอง ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C 50°C และ 60°C เป็นระยะเวลา 360 นาที โดยมีการเก็บผลอุณหภูมิที่ความหนาต่างๆคือ ผนังภายนอก (T_w) ผนังภายนอกตำแหน่งที่มีสารเปลี่ยนสถานะ ที่ความหนา 0 mm ($T_{w,PCM}$) ที่ความหนา 25 mm (T_{w25}) ที่ความหนา 50 mm (T_{w50}) ผนังภายในที่ความหนา (T_i) ผนังภายในตำแหน่งที่มีสารเปลี่ยนสถานะ ที่ความหนา 75 mm ($T_{i,PCM}$) และอุณหภูมิห้อง (T_r) เมื่อพิจารณาอุณหภูมิสภาพแวดล้อมห้องทดสอบที่ 40°C พบว่าค่าอุณหภูมิเริ่มต้น ที่ผนังภายนอก (T_w) ที่ความหนา 0 mm จะมีค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงเลาประมาณ 0-100 นาที หลังจากนั้นอุณหภูมิจะคงที่เมื่อเวลาผ่านไปเป็นเวลาประมาณ 240-360 นาที ดังแสดงในรูป 4.13 สำหรับตำแหน่งอุณหภูมิที่ความหนา 0 mm ที่มีสารเปลี่ยนสถานะ 25 mm 50 mm 75 mm ที่มีสารเปลี่ยนสถานะและไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ และอุณหภูมิห้องมีแนวโน้มที่คล้าย ๆ กับตำแหน่งภายนอกที่ 0 mm โดยอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงประมาณ 240-360 นาที ที่ตำแหน่ง $x=0$ mm $x_{PCM}=0$ mm $x=25$ mm $x=50$ mm $x_{PCM}=75$ mm และ $x=75$ mm มีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 42.4°C 42.0°C 38.2°C 34.1°C 30.8°C และ 30.5°C ตามลำดับและมีอุณหภูมิห้องเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 28.7°C ดังตาราง 4.9

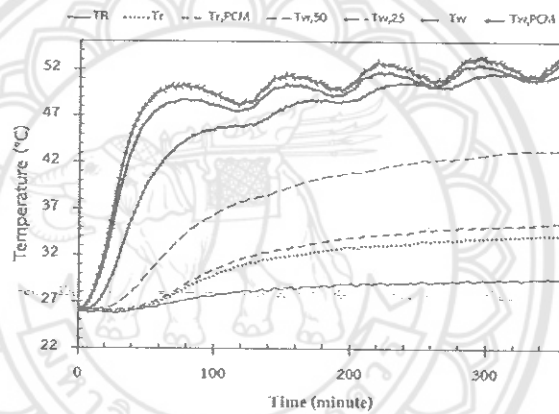
จากการทดลองพบว่าความหนาที่มีผลต่ออุณหภูมิของผนังเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิของอิฐมวลเบาที่มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขที่อุณหภูมิทดสอบ 50°C และ 60°C สังเกตได้ว่าแนวโน้มของอุณหภูมิผนังที่ตำแหน่งต่างๆ และ อุณหภูมิห้อง มีแนวโน้มคล้ายกับห้องจำลองที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C ดังรูป 4.14 และ 4.15 และพบว่าที่อุณหภูมิควบคุมที่ 50°C ที่ช่วงเวลาประมาณ 240-360 นาที มีค่าอุณหภูมิผนังเฉลี่ยที่ตำแหน่ง $x=0$ mm $x_{PCM}=0$ mm $x=25$ mm $x=50$ mm $x_{PCM}=75$ mm และ $x=75$ mm มีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 47.2°C 46.8°C 43.5°C 37.2°C 32.6°C และ 31.6°C ตามลำดับ และอุณหภูมิห้องเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 27.2°C และพบว่าที่อุณหภูมิควบคุมที่ 60°C ที่ช่วงเวลาประมาณ 240-360 นาที มีค่าอุณหภูมิผนังเฉลี่ยที่ตำแหน่ง $x=0$ mm $x_{PCM}=0$ mm $x=25$ mm $x=50$ mm $x_{PCM}=75$ mm และ $x=75$ mm มีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 49.2°C 48.6°C 46.2°C 48.2°C 31.3°C และ 30.7°C ตามลำดับ และอุณหภูมิห้องเฉลี่ยมีค่า 26.7°C ดังตาราง 4.9



รูป 4.13 อิฐมวลเบาที่มี PCM 4 หลุม ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 40°C



รูป 4.14 อิฐมวลเบาที่ PCM 4 หลุม ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 50°C



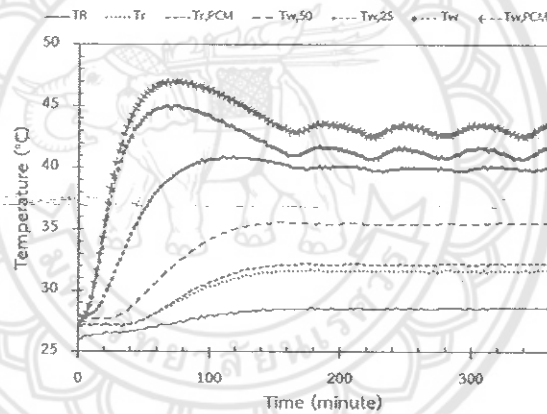
รูป 4.15 อิฐมวลเบาที่ PCM 4 หลุม ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 60°C

อิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์

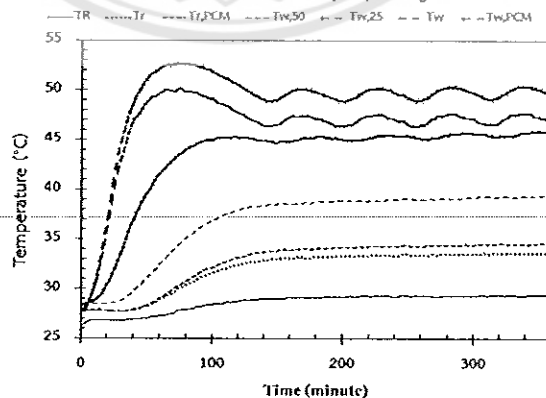
การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของอิฐมวลเบา โดยมีการทดสอบในห้องทดลอง ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C 50°C และ 60°C เป็นระยะเวลา 360 นาที โดยมีการเก็บผลอุณหภูมิที่ความหนาต่างๆ คือ ผนังภายนอก (T_w) ที่ความหนา 0 mm ที่ความหนา 25 mm (T_{w25}) ที่ความหนา 50 mm (T_{w50}) ผนังภายในที่ความหนา (T_i) ผนังภายใน ที่ความหนา 75 mm) และอุณหภูมิห้อง (T_R) เมื่อพิจารณาอุณหภูมิสภาพแวดล้อมห้องทดสอบที่ 40°C พบว่าค่าอุณหภูมิเริ่มต้น ที่ผนังภายนอก (T_w) ที่ความหนา 0 mm จะมีค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงเวลาประมาณ 0-100 นาที หลังจากนั้นอุณหภูมิจะคงที่เมื่อเวลาผ่านไปในช่วงเวลาประมาณ 240-360 นาทีที่ดังแสดงในรูป 4.16 สำหรับตำแหน่งอุณหภูมิที่ความหนา 25 mm 50 mm 75 mm และอุณหภูมิห้องมีลักษณะแนวโน้มที่คล้าย ๆ กับตำแหน่งภายนอกที่ 0 mm โดยอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงประมาณ 240-360 ที่ตำแหน่ง =0 mm x=25 mm x=50 mm และ x=75 mm มีค่า

อุณหภูมิเท่ากับ 43.1°C 38.8°C 33.9°C และ 30.9°C ตามลำดับ และมีอุณหภูมิห้องเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 28.5°C ดังตาราง 4.9

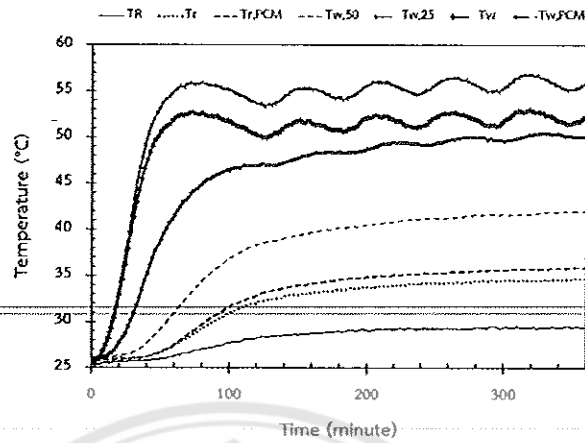
จากการทดลองพบว่าความหนาแน่นมีผลต่ออุณหภูมิของผนังเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิของอิฐมวลเบามีค่าลดลง เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขที่อุณหภูมิทดสอบ 50°C และ 60°C สังเกตได้ว่าลักษณะแนวโน้มของอุณหภูมิผนังที่ตำแหน่งต่างๆ และ อุณหภูมิห้อง มีลักษณะคล้ายกับห้องจำลองที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C ดังรูป 4.17 และ 4.18 และพบว่าที่อุณหภูมิควบคุมที่ 50°C ที่ช่วงเวลาประมาณ 240-360 นาที มีค่าอุณหภูมิผนังเฉลี่ยที่ตำแหน่ง $x=0\text{ mm}$ $x=25\text{ mm}$ $x=50\text{ mm}$ และ $x=75\text{ mm}$ มีค่าอุณหภูมิเท่ากับ ดังนี้ 48.8°C 43.3°C 36.3°C และ 32.7°C ตามลำดับ และอุณหภูมิห้องเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 29.2°C และพบว่าที่อุณหภูมิควบคุมที่ 60°C ที่ช่วงเวลาประมาณ 240-360 นาที มีค่าอุณหภูมิผนังเฉลี่ยที่ตำแหน่ง $x=0\text{ mm}$ $x=25\text{ mm}$ $x=50\text{ mm}$ และ $x=75\text{ mm}$ มีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 50.5°C 45.5°C 38.7°C และ 33.6°C ตามลำดับ และอุณหภูมิห้องเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 29.4°C ดังตาราง 4.9



รูป 4.16 อิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 40°C



รูป 4.17 อิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 50°C



รูป 4.18 อิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 60°C

ตาราง 4.9 อุณหภูมิเฉลี่ยความหนาของอิฐมวลเบาในห้องทดสอบ

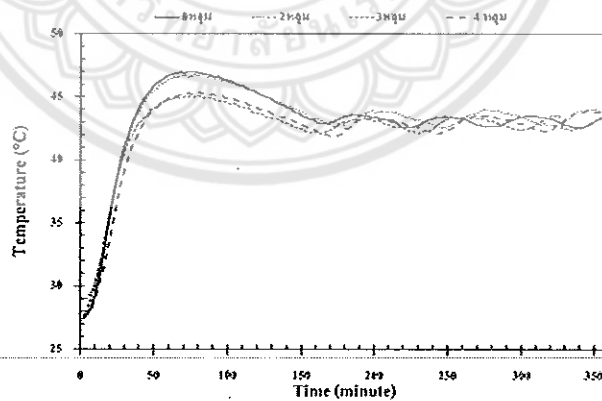
T(°C)	ความหนา (mm)	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)			
		อิฐมวลเบา เชิงพาณิชย์	PCM 2 หลุม	PCM3 หลุม	PCM 4 หลุม
40	0	43.1	43.3	42.6	42.4
	25	38.8	39.2	38.6	38.2
	50	33.9	35.0	34.6	34.1
	75	30.9	31.7	30.9	30.8
50	0	48.8	48.9	48.1	47.2
	25	43.3	43.1	44.3	43.5
	50	36.9	37.0	39.1	37.2
	75	32.7	32.6	33.7	32.6
60	0	50.5	55.7	52.5	49.2
	25	45.5	48.6	46.7	46.2
	50	38.7	40.8	40.0	38.2
	75	33.8	34.8	33.5	31.2

อุณหภูมิผนังภายนอกของอิฐมวลเบาในเงื่อนไขต่างๆ

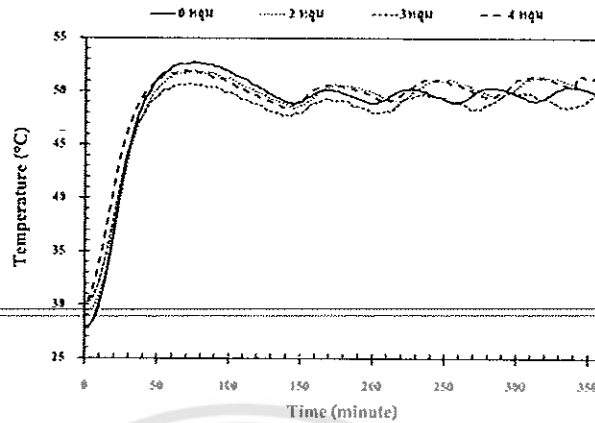
การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของอิฐมวลเบา โดยมีการทดสอบในห้องทดลอง ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C 50°C และ 60°C เป็นระยะเวลา 360 นาที โดยมีการเก็บผลอุณหภูมิที่ ผนังภายนอกในเงื่อนไขต่างๆคือ อิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม 3 หลุม 4 หลุม

และอุณหภูมิเบาเชิงพาณิชย์ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิผนังภายนอกที่ 40°C พบว่าจะมีค่าอุณหภูมิผนังภายนอกของอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม เพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงเวลาประมาณ 0-100 นาที หลังจากนั้นอุณหภูมิจะคงที่เมื่อเวลาผ่านไปเป็นเวลาประมาณ 240-360 นาที ดังแสดงในรูป 4.19 สำหรับอุณหภูมิผนังภายนอกของอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ มีลักษณะแนวโน้มที่คล้าย ๆ กับอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม โดยอุณหภูมิเฉลี่ยผนังภายนอกในช่วงเวลาประมาณ 240-360 นาที ของอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์มีค่าเท่ากับ 43.3°C 42.6°C 42.4°C และ 43.1°C ตามลำดับ

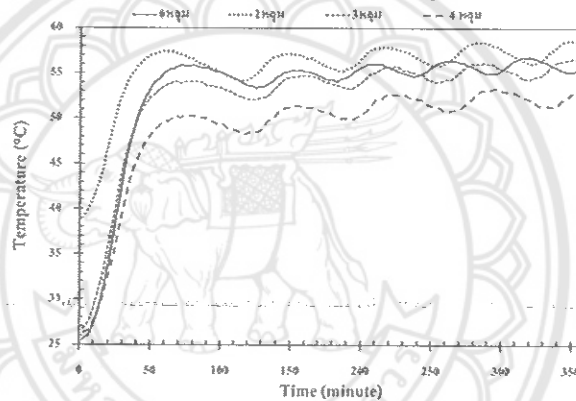
จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิผนังภายนอกมีค่ามากที่สุดคือของอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุมเมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขที่อุณหภูมิทดสอบ 50°C และ 60°C สังเกตได้ว่าลักษณะแนวโน้มของอุณหภูมิผนังภายนอก มีลักษณะคล้ายกับห้องจำลองที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C ดังรูป 4.20 และ 4.21 ซึ่งอุณหภูมิผนังภายนอก ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 50°C ช่วงเวลาประมาณ 240-360 นาที ผนังภายนอกของอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ คือ 48.9°C 48.1°C 47.2°C และ 48.8°C ตามลำดับ และอุณหภูมิผนังภายนอก ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 60°C ช่วงเวลาประมาณ 240-360 นาที ผนังภายนอกของอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ คือ 55.7°C 52.5°C 49.2°C และ 50.5°C ตามลำดับ



รูป 4.19 อุณหภูมิผนังภายนอก ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 40°C



รูป 4.20 อุณหภูมิผนังภายนอก ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 50°C

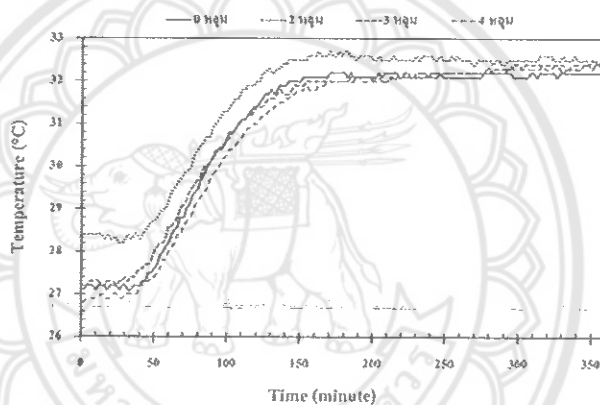


รูป 4.21 อุณหภูมิผนังภายนอก ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 60°C

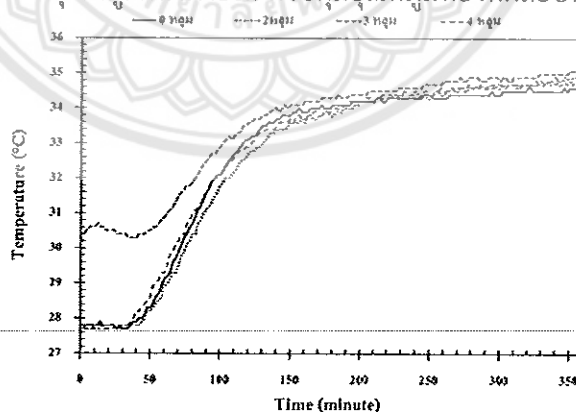
อุณหภูมิผนังภายในของอิฐมวลเบาในเงื่อนไขต่างๆ

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของอิฐมวลเบา โดยมีการทดสอบในห้องทดลอง ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C 50°C และ 60°C เป็นระยะเวลา 360 นาที โดยมีการเก็บผลอุณหภูมิที่ ผนังภายในเงื่อนไขต่างๆคือ อิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิผนังภายในที่ 40°C พบว่าจะมีค่าอุณหภูมิผนังภายในของอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม เพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงเวลาประมาณ 0-100 นาที หลังจากนั้นอุณหภูมิจะคงที่เมื่อเวลาผ่านไปเป็นเวลาประมาณ 240-360 นาที ดังแสดงในภาพ 4.22 สำหรับอุณหภูมิผนังภายในของอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ มีลักษณะแนวโน้มที่คล้าย ๆ กับอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม โดยอุณหภูมิเฉลี่ยผนังภายในช่วงเวลาประมาณ 240-360 นาทีของอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์มีค่าเท่ากับ 39.2°C 38.6°C 38.2°C และ 38.8°C ตามลำดับ

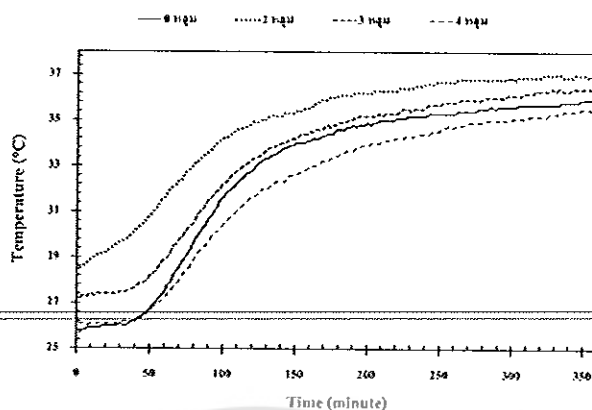
จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิผนังภายในมีค่ามากที่สุดคือของอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุมเมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขที่อุณหภูมิทดสอบ 50°C และ 60°C สังเกตได้ว่าลักษณะแนวโน้มของอุณหภูมิผนังภายใน มีลักษณะคล้ายกับห้องจำลองที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C ดังรูป 4.23 และ 4.24 ซึ่งอุณหภูมิผนังภายใน ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 50°C ช่วงเวลาประมาณ 240-360 นาที ผนังภายในของอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ คือ 43.1°C 44.3°C 43.5°C และ 43.7°C ตามลำดับ และอุณหภูมิผนังภายใน ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 60°C ช่วงเวลาประมาณ 240-360 นาที ผนังภายในของอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ คือ 40.8°C 46.7°C 46.2°C และ 45.5°C ตามลำดับ



รูป 4.22 อุณหภูมิผนังภายใน ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 40°C



รูป 4.23 อุณหภูมิผนังภายใน ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 50°C

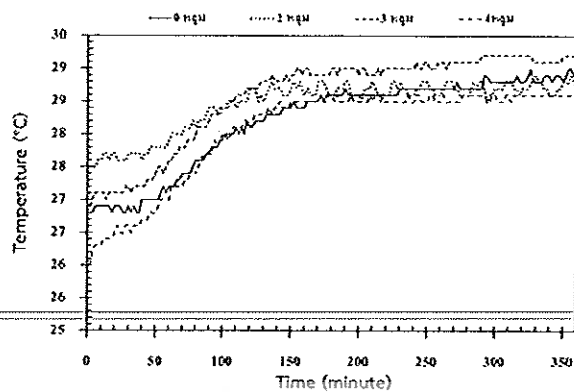


รูป 4.24 อุณหภูมิผนังภายใน ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 60°C

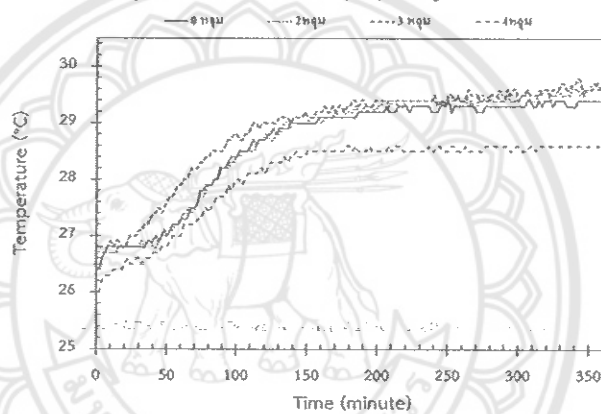
อุณหภูมิภายในห้องของอิฐมวลเบาในเงื่อนไขต่างๆ

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของอิฐมวลเบา โดยมีการทดสอบในห้องทดลอง ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C 50°C และ 60°C เป็นระยะเวลา 360 นาที โดยมีการเก็บผลอุณหภูมิห้องทดสอบในเงื่อนไขต่างๆคือ อิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 40°C พบว่าจะมีค่าอุณหภูมิห้องทดสอบของอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม เพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงเวลาประมาณ 0-100 นาที หลังจากนั้นอุณหภูมิจะคงที่เมื่อเวลาผ่านไปเป็นเวลาประมาณ 240-360 นาที ดังแสดงในรูป 4.25 สำหรับอุณหภูมิห้องทดสอบของอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ มีลักษณะแนวโน้มที่คล้าย ๆ กันกับอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม โดยอุณหภูมิเฉลี่ยห้องทดสอบช่วงเวลาประมาณ 240-360 นาทีของอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์มีค่าเท่ากับ 28.5°C 29.1°C 28.7°C และ 28.5°C ตามลำดับ ดังตาราง 4.10

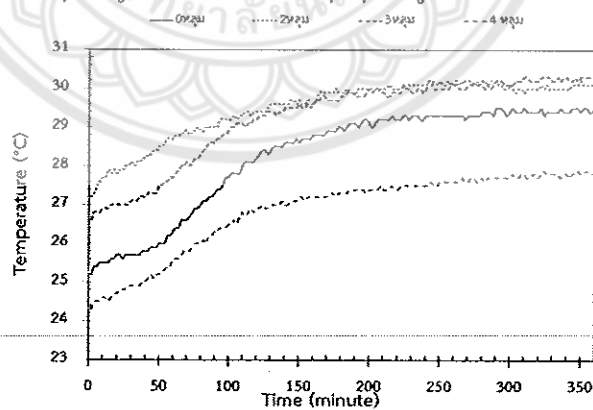
จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิห้องทดสอบมีค่าต่ำที่สุดคือ ของอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 4 หลุมเมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม 3 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 50°C และ 60°C สังเกตได้ว่าลักษณะแนวโน้มของอุณหภูมิห้องทดสอบ มีลักษณะคล้ายกับห้องจำลองที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C ดังรูป 4.26 และ 4.27 ซึ่งอุณหภูมิภายในห้องทดสอบ ที่ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบ 50°C ช่วงเวลาประมาณ 240-360 นาที อุณหภูมิห้องทดสอบของอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ คือ 29.3°C 29.4°C 30.0°C และ 27.2°C ตามลำดับ และอุณหภูมิผนังภายใน ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 60°C ช่วงเวลาประมาณ 240-360 นาที ผนังภายในของอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ คือ 30.0°C 30.1°C 26.7°C และ 29.4°C ดังตาราง 4.10



รูป 4.25 อุณหภูมิภายในห้อง ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 40°C



รูป 4.26 อุณหภูมิภายในห้อง ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 50°C



รูป 4.27 อุณหภูมิภายในห้อง ควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 60°C

ตาราง 4.10 ผลการทดลองอุณหภูมิภายในห้องทดลอง

อุณหภูมิภายในห้องทดลองเฉลี่ย (°C)				
T(°C)	อิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์	PCM 2 หลุม	PCM 3 หลุม	PCM 4 หลุม
40	28.5	28.5	29.1	28.7
50	29.3	29.4	30.0	27.2
60	29.4	30.0	30.1	26.7

การหน่วงความร้อนในห้องสอบ

ตาราง 4.11 แสดงค่าการหน่วงความร้อนของอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 2 หลุม 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 60°C ระยะเวลา 360 นาที และมีการเก็บผลอุณหภูมิที่ความหนาต่างๆคือ 0 mm 25 mm 50 mm และ 75 mm เมื่อพิจารณาความหนาที่อิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 2 หลุม ที่ความหนาต่างๆคือ 0 mm 25 mm 50 mm และ 75 mm มีค่าการหน่วงความร้อนคือ 0 14 52 และ 58 นาที ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าค่าการหน่วงความร้อนของอิฐมวลเบาที่มีค่ามากขึ้นเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าการหน่วงความร้อนของอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ มีแนวโน้มคล้ายๆกับอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 2 หลุม ซึ่งอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 3 หลุม ความหนาต่างๆคือ 0 mm 25 mm 50 mm และ 75 mm มีค่าการหน่วงความร้อนคือ 0 16 44 และ 52 นาที ตามลำดับ อิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม ที่ความหนาต่างๆคือ 0 mm 25 mm 50 mm และ 75 mm มีค่าการหน่วงความร้อนคือ 0 16 48 และ 114 นาที ตามลำดับ และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ที่ความหนาต่างๆคือ 0 mm 25 mm 50 mm และ 75 mm มีค่าการหน่วงความร้อนคือ 0 34 78 และ 90 นาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะสามารถขยายเวลาการส่งผ่านความร้อนจากผนังภายนอกไปยังผนังด้านในได้ ดังตาราง 4.11

ตาราง 4.11 ค่าหน่วงเวลา (Time lag)

จำนวน PCM	ค่าความหน่วงความร้อนตำแหน่งความหนาต่างๆ (นาที)			
	0 mm	25 mm	50 mm	75 mm
อิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์	0	34	78	90
2 หลุม	0	14	52	58
3 หลุม	0	16	44	52
4 หลุม	0	16	48	114

ปัจจัยการลดลง (Decrement factor)

ปัจจัยการลดลงอุณหภูมิของอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 2 หลุม 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ โดยมีการทดสอบในห้องทดลอง ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C 50°C และ 60°C เป็นระยะเวลา 360 นาที โดยมีการเก็บผลอุณหภูมิที่ความหนาต่างๆคือ 0 mm 25 mm 50 mm และ 75 mm เมื่อพิจารณาห้องทดสอบที่ 40°C พบว่าค่าปัจจัยการลดลงมีค่าลดลงเมื่อความหนาของอิฐมวลเบาเพิ่มขึ้น ซึ่งอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 2 หลุม 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ มีค่าปัจจัยการลดลงที่น้อยที่สุดคือความหนา 75 mm อยู่ที่ประมาณ 0.129 0.195 0.089 และ 0.129

จากการทดลองพบว่าความหนามีผลต่อปัจจัยการลดลงของอุณหภูมิอิฐมวลเบาเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิของอิฐมวลเบาที่มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขที่อุณหภูมิทดสอบ 50°C และ 60°C สังเกตได้ว่าลักษณะแนวโน้มของปัจจัยการลดลงของอุณหภูมิอิฐมวลเบา มีลักษณะคล้ายกับห้องจำลองที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C และพบว่าที่อุณหภูมิควบคุมที่ 50°C ปัจจัยการลดลงอุณหภูมิของอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 2 หลุม 3 หลุม 4 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ มีค่าปัจจัยการลดลงที่น้อยที่สุด คือความหนา 75 mm อยู่ที่ประมาณ 0.090 0.042 0.099 และ 0.176 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิควบคุมที่ 60°C อยู่ที่ประมาณ 0.060 0.097 0.059 และ 0.085 ดังตาราง 4.12

ตาราง 4.12 ปัจจัยการลดลง (Decrement factor)

ปัจจัยการลดลง (Decrement factor)					
Temperature (°C)	x (mm)	อิฐเชิงพาณิชย์	2 หลุม	3 หลุม	4 หลุม
40	0	0	0	0	0
	25	0.328	0.443	0.383	0.356
	50	0.133	0.378	0.102	0.178
	75	0.129	0.195	0.054	0.089
50	0	0	0	0	0
	25	0.329	0.293	0.236	0.302
	50	0.230	0.133	0.088	0.147
	75	0.176	0.090	0.042	0.099
60	0	0	0	0	0
	25	0.302	0.326	0.418	0.254
	50	0.181	0.114	0.208	0.127
	75	0.085	0.060	0.097	0.059

ผลการทดสอบดังกล่าวสังเกตได้อิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม มีอุณหภูมิห้องต่ำกว่าอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 2 หลุม 3 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ และอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม มีค่าหน่วงเวลา (Time lag) ยาวนานที่สุดอีกทั้งมีค่าปัจจัยการลดลง (Decrement factor) ที่น้อยกว่าอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 2 หลุม 3 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ จึงนำอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม มาทดสอบในสภาพอากาศจริง

ผลการทดลองสมบัติทางความร้อนในสภาพแวดล้อมจริง

การทดสอบสมบัติทางความร้อนในสภาพอากาศจริงของห้องทดสอบอิฐมอญ อิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ และอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม มีผลการทดลองดังนี้

ห้องทดสอบอิฐมอญ

จากรูป 4.28 แสดงอุณหภูมิผนังภายนอก อุณหภูมิผนังภายใน และอุณหภูมิห้องทดสอบของอิฐมอญในช่วงเวลา 3 วัน

วันที่ 1

พบว่าอุณหภูมิผนังภายนอก อุณหภูมิผนังภายใน และอุณหภูมิห้องทดสอบของอิฐมอญมีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วงเวลา 14.44 น. 15.04 น. และ 15.14 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 54.1°C 50.3°C และ 45.0°C ตามลำดับ โดยมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง $0-900\text{ W/m}^2$ พบว่าอุณหภูมิมีน้อยที่สุดในช่วงเวลา 02.00 น. - 08.00 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 26.9°C 27.4°C และ 27.2°C ตามลำดับ และมีความเร็วลมอยู่ในช่วง $0.10-2.00\text{ m/s}$

วันที่ 2

พบว่าอุณหภูมิผนังภายนอก อุณหภูมิผนังภายใน และอุณหภูมิห้องทดสอบของอิฐมอญมีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วงเวลา 14.02 น. 15.02 น. และ 14.47 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 54.7°C 49.5°C และ 44.3°C ตามลำดับ โดยมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง $0-899\text{ W/m}^2$ พบว่าอุณหภูมิมีน้อยที่สุดในช่วงเวลา 02.00 น. - 08.00 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 26.7°C 27.4°C และ 27.2°C ตามลำดับ และมีความเร็วลมอยู่ในช่วง $0.10-2.00\text{ m/s}$

วันที่ 3

พบว่าอุณหภูมิผนังภายนอก อุณหภูมิผนังภายใน และอุณหภูมิห้องทดสอบของอิฐมอญมีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วงเวลา 14.13 น. 14.58 น. และ 15.03 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 54.2°C 48.0°C และ 44.1°C ตามลำดับ โดยมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง $0-886\text{ W/m}^2$ พบว่าอุณหภูมิมีน้อยที่สุดในช่วงเวลา

ในช่วงเวลา 02.00 น. – 08.00 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 25.7°C 26.4°C และ 26.7°C ตามลำดับ และมีความเร็วลมอยู่ในช่วง 0.10- 2.00 m/s

ห้องทดสอบอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์

จากรูป 4.29 แสดงอุณหภูมิผนังภายนอก อุณหภูมิผนังภายใน และอุณหภูมิห้องของทดสอบอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ในช่วงเวลา 3 วัน

วันที่ 1

พบว่าอุณหภูมิผนังภายนอก อุณหภูมิผนังภายใน และอุณหภูมิห้องของทดสอบอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์มีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วงเวลา 13.25 น. 14.49 น. และ 14.54 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 56.0°C 44.9°C และ 42.7°C ตามลำดับ โดยมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง 0-900 W/m^2 พบว่าอุณหภูมิมีน้อยที่สุดในช่วงเวลา 04.00 น. – 08.00 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 26.1°C 27.1°C และ 26.2°C ตามลำดับ และมีความเร็วลมอยู่ในช่วง 0.10- 2.00 m/s

วันที่ 2

พบว่าอุณหภูมิผนังภายนอก อุณหภูมิผนังภายใน และอุณหภูมิห้องของทดสอบอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์มีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วงเวลา 12.02 น. 14.17 น. และ 14.32 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 50.9°C 42.2°C และ 40.8°C ตามลำดับ โดยมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง 0-899 W/m^2 พบว่าอุณหภูมิมีน้อยที่สุดในช่วงเวลา 02.00 น. – 08.00 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 26.4°C 27.8°C และ 26.6°C ตามลำดับ และมีความเร็วลมอยู่ในช่วง 0.10- 2.00 m/s

วันที่ 3

พบว่าอุณหภูมิผนังภายนอก อุณหภูมิผนังภายในและ อุณหภูมิห้องของทดสอบอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์มีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วงเวลา 12.13 น. 13.48 น. และ 13.58 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 51.1°C 42.7°C และ 41.1°C ตามลำดับ โดยมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง 0-866 W/m^2 พบว่าอุณหภูมิมีน้อยที่สุดในช่วงเวลา 02.00 น. – 08.00 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 26.5°C 26.8°C และ 26.6°C ตามลำดับ และมีความเร็วลมอยู่ในช่วง 0.10- 2.00 m/s

ห้องทดสอบอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม

จากรูป 4.30 แสดงอุณหภูมิผนังภายนอก อุณหภูมิผนังภายใน และอุณหภูมิห้องของทดสอบอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม ในช่วงเวลา 3 วัน

วันที่ 1

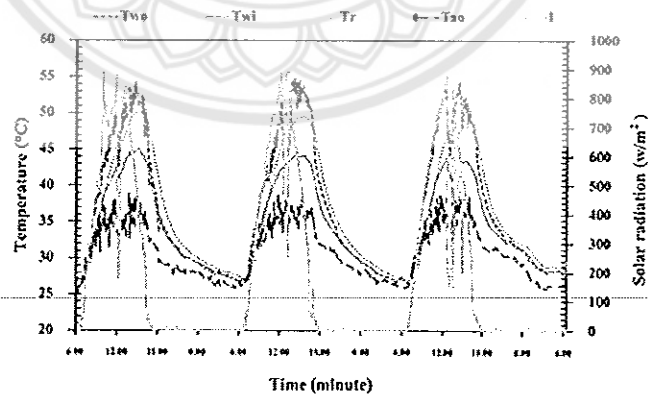
พบว่าอุณหภูมิผนังภายนอก อุณหภูมิผนังภายใน และอุณหภูมิของห้องทดสอบมีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วงเวลา 12.34 น. 15.04 น. และ 15.14 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 51.5°C 42.7°C และ 41.8°C ตามลำดับ โดยมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง $0-900 \text{ W/m}^2$ พบว่าอุณหภูมิมีน้อยที่สุดในช่วงเวลา 02.00 น. - 08.00 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 25.7°C 26.1°C และ 25.7°C ตามลำดับ และมีความเร็วลมอยู่ในช่วง $0.10- 2.00 \text{ m/s}$

วันที่ 2

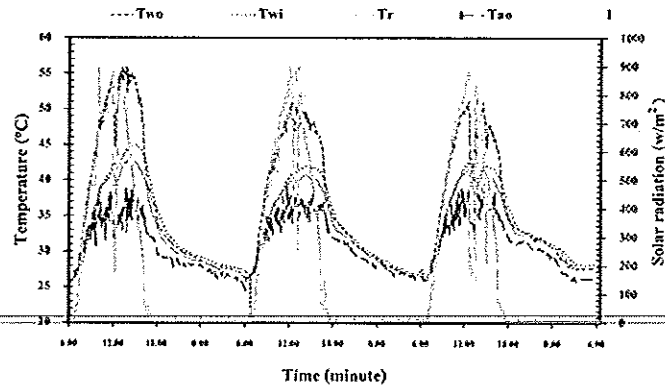
พบว่าอุณหภูมิผนังภายนอก อุณหภูมิผนังภายใน และอุณหภูมิของห้องทดสอบมีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วงเวลา 11.57 น. 14.27 น. และ 14.32 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 50.9°C 42.2°C และ 40.8°C ตามลำดับ โดยมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง $0-899 \text{ W/m}^2$ พบว่าอุณหภูมิมีน้อยที่สุดในช่วงเวลา 02.00 น. - 08.00 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 26.4°C 27.9°C และ 26.5°C ตามลำดับ และมีความเร็วลมอยู่ในช่วง $0.10- 2.00 \text{ m/s}$

วันที่ 3

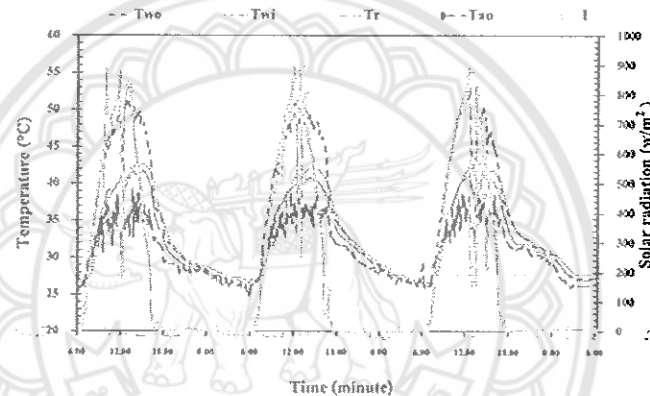
พบว่าอุณหภูมิผนังภายนอก อุณหภูมิผนังภายใน และอุณหภูมิของห้องทดสอบมีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วงเวลา 12.18 น. 14.28 น. และ 14.28 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 52.8°C 42.6°C และ 41.3°C ตามลำดับ โดยมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง $0-866 \text{ W/m}^2$ พบว่าอุณหภูมิมีน้อยที่สุดในช่วงเวลา 02.00 น. - 08.00 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 26.1°C 26.5°C และ 26.1°C ตามลำดับ และมีความเร็วลมอยู่ในช่วง $0.10- 2.00 \text{ m/s}$



รูป 4.28 อุณหภูมิห้องทดสอบอิฐมอญ



รูป 4.29 อุณหภูมิห้องทดสอบอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์



รูป 4.30 อุณหภูมิห้องทดสอบอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม

อุณหภูมิผนังภายนอกของห้องทดสอบประเภทต่างๆ

จากรูป 4.31 แสดงอุณหภูมิผนังภายนอกของอิฐมอญ อุณหภูมิผนังภายนอกอิฐเชิงพาณิชย์และอุณหภูมิผนังภายนอกอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม ในช่วงเวลา 3 วัน

วันที่ 1

พบว่าอุณหภูมิผนังภายนอกของอิฐมอญ อุณหภูมิผนังภายนอกอิฐเชิงพาณิชย์และ อุณหภูมิห้องผนังภายนอกอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม มีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วงเวลา 14.44 น. 13.25 น. และ 12.34 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 45.5°C 42.7°C และ 41.8°C ตามลำดับ โดยมีความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง $0-900 \text{ W/m}^2$ พบว่าอุณหภูมิมีน้อยที่สุดในช่วงเวลา 02.00 น. - 08.00 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 26.8°C 26.8°C และ 25.7°C ตามลำดับ และมีความเร็วลมอยู่ในช่วง $0.10-2.00 \text{ m/s}$

วันที่ 2

พบว่าอุณหภูมิผนังภายนอกของอิฐมวลเบา อุณหภูมิผนังภายนอกอิฐเชิงพาณิชย์และ อุณหภูมิห้อง ผนังภายนอกอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม มีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วงเวลา 14.02 น. 12.20 น. และ 11.57 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 54.7°C 50.9°C และ 50.3°C ตามลำดับ โดยมีความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง $0-899\text{ W/m}^2$ พบว่าอุณหภูมิมีน้อยที่สุดในช่วงเวลา 02.00 น. - 08.00 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 26.7°C 26.4°C และ 26.4°C ตามลำดับ และมีความเร็วลมอยู่ในช่วง $0.10-2.00\text{ m/s}$

วันที่ 3

พบว่าอุณหภูมิผนังภายนอกของอิฐมวลเบา อุณหภูมิผนังภายนอกอิฐเชิงพาณิชย์และ อุณหภูมิห้อง ผนังภายนอกอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม มีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วงเวลา 14.13 น. 12.18 น. และ 12.18 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 54.2°C 51.1°C และ 52.8°C ตามลำดับ โดยมีความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง $0-866\text{ W/m}^2$ พบว่าอุณหภูมิมีน้อยที่สุดในช่วงเวลา 02.00 น. - 08.00 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 26.6°C 26.5°C และ 26.1°C ตามลำดับ และมีความเร็วลมอยู่ในช่วง $0.10-2.00\text{ m/s}$

อุณหภูมิผนังภายในของห้องทดสอบประเภทต่างๆ

จากรูป 4.32 แสดงอุณหภูมิผนังภายในของอิฐมวลเบา อุณหภูมิผนังภายในอิฐเชิงพาณิชย์ และ อุณหภูมิผนังภายในอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม ในช่วงเวลา 3 วัน

วันที่ 1

พบว่าอุณหภูมิผนังภายในของอิฐมวลเบา อุณหภูมิผนังภายในอิฐเชิงพาณิชย์ และอุณหภูมิผนังภายในอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุมมีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วงเวลา 15.04 น. 14.49 น. และ 15.04 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 50.3°C 44.9°C และ 42.7°C ตามลำดับ โดยมีความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง $0-900\text{ W/m}^2$ พบว่าอุณหภูมิมีน้อยที่สุดในช่วงเวลา 02.00 น. - 08.00 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 27.1°C 26.8°C และ 28.1°C ตามลำดับ และมีความเร็วลมอยู่ในช่วง $0.10-2.00\text{ m/s}$

วันที่ 2

พบว่าอุณหภูมิผนังภายในของอิฐมวลเบา อุณหภูมิผนังภายในอิฐเชิงพาณิชย์ และอุณหภูมิผนังภายในอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุมมีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วงเวลา 14.57 น. 14.27 น. และ 14.48 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 49.5°C 42.9°C และ 42.2°C ตามลำดับ โดยมีความ

ความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง $0-899 \text{ W/m}^2$ พบว่าอุณหภูมิมีค่าน้อยที่สุดในช่วงเวลา 02.00 น. – 08.00 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 27.3°C 26.8°C และ 26.2°C ตามลำดับ และมีความเร็วลมอยู่ในช่วง $0.10- 2.00 \text{ m/s}$

วันที่ 3

พบว่าอุณหภูมิผนังภายในของอิฐมอญ อุณหภูมิผนังภายในอิฐเชิงพาณิชย์ และอุณหภูมิผนังภายในอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุมมีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วงเวลา 14.58 น. 13.53 น. และ 14.28 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 48.3°C 42.7°C และ 42.6°C ตามลำดับ โดยมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง $0-866 \text{ W/m}^2$ พบว่าอุณหภูมิมีค่าน้อยที่สุดในช่วงเวลา 02.00 น. – 08.00 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 27.6°C 26.8°C และ 26.5°C ตามลำดับ และมีความเร็วลมอยู่ในช่วง $0.10- 2.00 \text{ m/s}$

อุณหภูมิภายในห้องทดสอบประเภทต่างๆ

จากรูป 4.33 แสดงอุณหภูมิห้องของอิฐมอญ อุณหภูมิห้องอิฐเชิงพาณิชย์ และอุณหภูมิห้องอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม ในช่วงเวลา 3 วัน

วันที่ 1

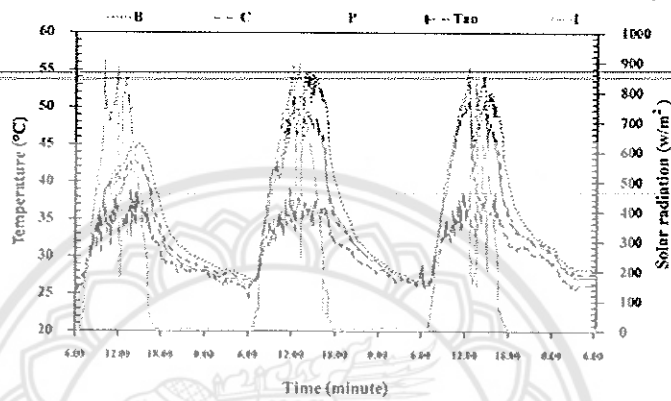
พบว่าอุณหภูมิห้องของอิฐมอญ อุณหภูมิห้องอิฐเชิงพาณิชย์ และอุณหภูมิห้องอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม มีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วงเวลา 15.14 น. 14.54 น. และ 15.14 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 45.0°C 42.7°C และ 41.8°C ตามลำดับ โดยมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง $0-900 \text{ W/m}^2$ พบว่าอุณหภูมิมีค่าน้อยที่สุดในช่วงเวลา 02.00 น. – 08.00 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 26.8°C 26.8°C และ 25.7°C ตามลำดับ และมีความเร็วลมอยู่ในช่วง $0.10- 2.00 \text{ m/s}$

วันที่ 2

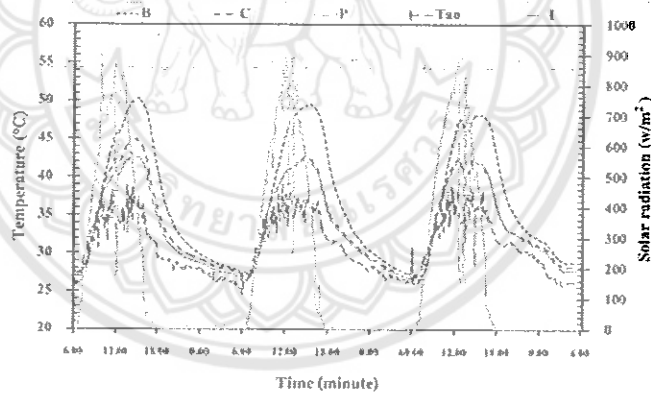
พบว่าอุณหภูมิห้องของอิฐมอญ อุณหภูมิห้องอิฐเชิงพาณิชย์ และอุณหภูมิห้องอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม มีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วงเวลา 14.47 น. 14.37 น. และ 14.28 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 44.3°C 40.8°C และ 40.8°C ตามลำดับ โดยมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง $0-899 \text{ W/m}^2$ พบว่าอุณหภูมิมีค่าน้อยที่สุดในช่วงเวลา 02.00 น. – 08.00 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 27.0°C 26.6°C และ 26.6°C ตามลำดับ และมีความเร็วลมอยู่ในช่วง $0.10- 2.00 \text{ m/s}$

วันที่ 3

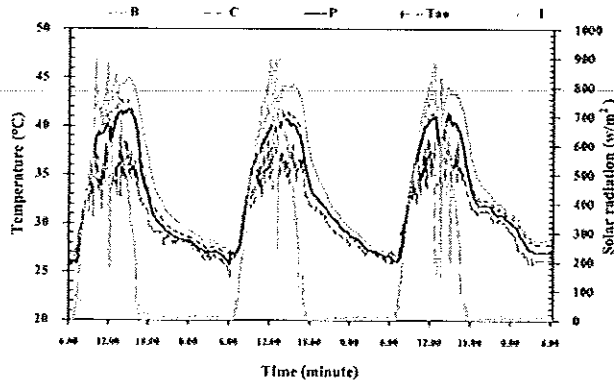
พบว่าอุณหภูมิห้องของอิฐมวลฉนวน อุณหภูมิห้องอิฐเชิงพาณิชย์ และอุณหภูมิห้องอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม มีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วงเวลา 15.03 น. 13.58 น. และ 14.28 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 44.1°C 41.7°C และ 41.3°C ตามลำดับโดยมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง 0-866 W/m² พบว่าอุณหภูมิมีน้อยที่สุดในช่วงเวลา 02.00 น. - 08.00 น. ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 26.7°C 26.6°C และ 26.1°C ตามลำดับ และมีความเร็วลมอยู่ในช่วง 0.10-2.00 m/s



รูป 4.31 อุณหภูมิผนังภายนอกห้องทดสอบประเภทต่างๆ



รูป 4.32 อุณหภูมิผนังภายในห้องทดสอบประเภทต่างๆ



รูป 4.33 อุณหภูมิห้องทดสอบประเภทต่างๆ

การหน่วงความร้อนในห้องทดสอบในสภาพอากาศจริง

ตาราง 4.13 แสดงค่าการหน่วงความร้อนของอิฐมอญ อิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ และอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม โดยทดสอบระยะเวลา 3 วัน พบว่าตัวอย่างที่มีค่าการหน่วงความร้อนยาวนานที่สุดคือ อิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม อยู่ที่ประมาณ 145 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมอญ และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ ค่าความหน่วงความร้อนมีความยาวนานถึง 55 นาที และ 120 นาที แสดงให้เห็นว่าอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะสามารถขยายเวลาการส่งผ่านความร้อนจากผนังภายนอกไปยังผนังด้านในได้

ตาราง 4.13 การหน่วงความร้อนในห้องสอบในสภาพอากาศจริง

ประเภท	วันที่ 1 (นาที)	วันที่ 2 (นาที)	วันที่ 3 (นาที)	เฉลี่ย (นาที)
อิฐมอญ	60	60	45	55
อิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์	124	135	100	120
อิฐมวลเบาที่ใช้สารเปลี่ยนสถานะ 4 หลุม	150	155	130	145

ปัจจัยการลดลง (Decrement factor) ในสภาพอากาศจริง

ตาราง 4.14 แสดงปัจจัยการลดลงอิฐมอญ อิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ และอิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม โดยทดสอบระยะเวลา 3 วัน พบว่าปัจจัยการลดลง (Decrement factor) น้อยที่สุดคืออิฐมวลเบาที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 4 หลุม ค่าปัจจัยการลดลงอยู่ที่ประมาณ 0.628 เมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมอญ และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ ค่าปัจจัยการลดลงอยู่ที่ประมาณ 0.801 และ 0.656 ตามลำดับ

ตาราง 4.14 แสดงปัจจัยการลดลง (Decrement factor) ในสภาพอากาศจริง

ประเภท	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	เฉลี่ย
อิฐมอญ	0.841	0.792	0.771	0.801
อิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์	0.680	0.644	0.646	0.656
อิฐมวลเบาที่ใช้สารเปลี่ยนสถานะ 4 หลุม	0.643	0.640	0.602	0.628

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ปัจจุบันเก้าชานอ้อยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก เนื่องจากอ้อยสามารถนำไปผลิตเป็นน้ำตาลแล้วยังสามารถนำไปผลิตเป็นเอทานอลเพื่อเป็นส่วนผสมในน้ำมันแก๊สโซลอลอีกด้วย ดังนั้นเพื่อลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมและเพิ่มทางเลือกในการนำของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำเอามาใช้เป็นส่วนผสมในงานคอนกรีตมวลเบา เพื่อศึกษา พัฒนา และเพิ่มคุณสมบัติบางส่วนของคอนกรีตมวลเบา และหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการนำเก้าชานอ้อยมาใช้ในงานคอนกรีตมวลเบาต่อไป

จากการทดสอบคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเก้าชานอ้อยโดยนำไปทดแทนปริมาณของปูนซีเมนต์ปอซแลนด์ร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, และ 40 โดยน้ำหนัก และ นำเก้าชานอ้อยทดแทนปริมาณของทรายในสัดส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, และ 40 โดยน้ำหนัก โดยสัดส่วนที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงสมบัติกายภาพ เพิ่มค่าการรับแรงอัด และสามารถเพิ่มระยะเวลาในการหน่วงความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในอาคาร และสามารถลดคลื่นความร้อนส่งผ่านทางกรอบผนังอาคาร คอนกรีตมวลเบาเชิงพาณิชย์มีคุณสมบัติตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ชนิด C 10 สำหรับคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเก้าชานอ้อยมีคุณสมบัติตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ชนิด C 12 และ C 14

คอนกรีตมวลเบาที่มีการแทนที่ทรายด้วยเก้าชานอ้อยในสัดส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ได้นำไปเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยการนำสารเปลี่ยนสถานะมาประยุกต์ใช้ร่วม โดยมีการออกแบบหลุมรูปทรงกรวยเพื่อบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ จากการศึกษาลักษณะทางความร้อน การหน่วงความร้อน และ ปัจจัยการลดลงของอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะ เพื่อลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภายในอาคาร สามารถสรุปผลได้ดังนี้

สำหรับการทดสอบสมบัติทางความร้อนในห้องจำลอง เปรียบเทียบกับอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 2 หลุม 3 หลุม และ 4 หลุม จากการทดลองพบว่าห้องจำลองของอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 4 หลุม มีอุณหภูมิห้องต่ำที่สุดคือ 28.7°C 27.2°C และ 26.7°C ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C 50°C และ 60°C ตามลำดับ นอกจากนี้อิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 4 หลุม เมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมวลเบาแบบบอบไอน้ำที่ประยุกต์ใช้กับสารเปลี่ยนสถานะในเงื่อนไข 2 หลุม 3 หลุม และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ มีค่าหน่วงเวลา (Time lag) ยาวนานที่สุดมีค่าเท่ากับ 114 นาที และมีค่าปัจจัยการลดลง (Decrement factor) น้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.059

สำหรับการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง ผลการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิแวดล้อม ความเข้มแสง มีผลต่ออุณหภูมิผนังห้องทดสอบ พบว่าห้องทดสอบอิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้

เปลี่ยนสถานะจำนวน 4 หลุม มีอุณหภูมิห้องทดสอบเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 41.3°C เมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมอญ และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ มีค่าต่ำกว่าถึง ร้อยละ 19.37 และ 4.84 ตามลำดับ นอกจากนี้อิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 4 หลุม มีค่าการหน่วงความร้อนยาวนานกว่าอิฐมอญ และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ เป็นเวลาถึง 90 นาที และ 25 นาที และมีปัจจัยการลดลงน้อยที่สุดคือ 0.628 เมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมอญ และอิฐมวลเบาเชิงพาณิชย์ ซึ่งมีการลดลงของความร้อนเท่ากับ 0.801 และ 0.656 จากงานวิจัยนี้อิฐมวลเบาที่มีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะจำนวน 4 หลุม มีความเหมาะสมกับการใช้งานสภาพภูมิอากาศประเทศไทย โดยสามารถลดการถ่ายเทความร้อนจากร่างกายนอกเข้าสู่ภายในห้องได้ ทำให้งานวิจัยนี้สามารถพัฒนาต่อยอดเป็นวัสดุอาคารในอนาคตได้





บรรณานุกรม

- [1] Khedari, J., et al. (2001). Thailand climatic zones. *Journal of Renewable Energy*, 25, 267-280.
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน. (2548) เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์. สืบค้นเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2553, จาก http://www.stasolar.org/SUNTECH/sun_tech.htm
- [3] Ahmad I. (2010). Performance of antisolar Insulated roof system. *Renewable Energy*, 35, 36-41.
- [4] Toguyeni, D.Y.K., Coulibaly, O., Ouedraogo, A., Kouliadiati, J., Dutil, Y. and Rouse, D. (2012). Study of the Influence of roof insulation (involving local materials on cooling loads of houses built of clay and straw. *Energy and Buildings*, 50, 74-80.
- [5] Belusko, M., Bruno, F. and Saman, W. (2011). Investigation of the thermal resistance of timber attic spaces with reflective foil and bulk insulation, heat flow up. *Applied Energy*, 88, 127-137.
- [6] Saber, H.H. (2012). Investigation of thermal performance of reflective insulations for different applications. *Building and Environment*, 52, 32-44.
- [7] Alvarado, J.L., Terrell, W., Jr. and Johnson, M.D. (2009). Passive cooling systems for cement-based roofs. *Building and Environment*, 44, 1869-1875.
- [8] Chang P.C., Chiang, C.M. and Lai, C.M. (2008). Development and preliminary evaluation of double roof prototypes incorporating RBS (Radiant Barrier System). *Energy and Buildings*, 40: 140-147.
- [9] Miranville, F., Fakra, A.H., Guichard, S., Boyer, H., Praene, J.P. and Bigot, D. (2012). Evaluation of the thermal resistance of a roof-mounted multi-reflective radiant barrier for tropical and humid conditions: experimental study from field measurements. *Energy and Buildings*, 48, 79-90.
- [10] Asadi, S., Hassana, M. and Beheshti, A. (2012). Development and validation of a simple estimating tool to predict heating and cooling energy demand for attics of residential buildings. *Energy and Buildings*, 54, 12-21.
- [11] Oxizidis, S. and Papadopoulos, A.M. (2013). Performance of radiant cooling surfaces with respect to energy consumption and thermal comfort. *Energy and Buildings*, 57, 199-209.

- [12] Ungkoon, Y., et al. (2007). Analysis of microstructure and property of autoclave aerated concrete wall construction material. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 13(7), 1103 -1108.
- [13] โยธิน อึ้งกุล และปรีดา จันทวงษ์. (2552). การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนและวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของผนังคอนกรีตมวลเบา. *วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์*, 8 (2), 22-28.
- [14] กานต์ สุขสงญาตี, อธิพงษ์ ชัยสายัณห์, อำนาจ จันทน์กะพ้อ, ปรีดา จันทวงษ์, วิชาญ วิมานจันทร์ และพิชัย นามประกาย. (2550). การศึกษาเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ระหว่างบ้านที่ใช้ผนังอิฐมวลเบากับผนังมวลเบาด้านการถ่ายเทความร้อนและคุณสมบัติทางความร้อน. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 17, 34-42.
- [15] เอกชัย บุญสุวรรณ. (2549) การศึกษาการกระจายและการหน่วงความร้อนของผนังอิฐมวลเบาแบบหลายชั้นที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน. การศึกษาปัญหาพิเศษสำหรับฟิสิกส์ประยุกต์ 1.
- [16] Juanico, L. (2008). A new design of roof-integrated water solar collector for domestic heating and cooling. *Solar Energy*, 82, 481-492.
- [17] Fiaschi, D. and Bertolli, A. (2012). Design and exergy analysis of solar roofs: a viable solution with esthetic appeal to collect solar heat. *Renewable Energy*, 46, 60-71.
- [18] Maneewan, S., Hirunlabh, J., Khedari, J., Zeghmati, B. and Teekasap, S. (2005). Heat gain reduction by means of thermoelectric roof solar collector. *Solar Energy*, 78, 495-503.
- [19] Fong, K.F., Lee, C.K. and Chow, T.T. (2012). Comparative study of solar cooling systems with building-integrated solar collectors for use in sub-tropical regions like Hong Kong. *Applied Energy*, 90, 189-195.
- [20] Zhai, X.Q., Dai, Y.J. and Wang, R.Z. (2005). Comparison of heating and natural ventilation in a solar house induced by two roof solar collectors. *Applied Thermal Engineering*, 25, 741-757.
- [21] Ong, K.S. (2011). Temperature reduction in attic and ceiling via insulation of several passive roof designs. *Energy Conversion and Management*, 52, 2405-2411.
- [22] Saadatian, O., Sopian, K., Lim, C.H., Asim, N. and Sulaiman, M.Y. (2012). Trombe walls: a review of opportunities and challenges in research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 6340-6351.
- [23] Sun, W., Ji, J., Luo, C.L. and He, W. (2011). Performance of PV-trombe wall in winter correlated with south façade design. *Applied Energy*, 88, 224-231.
- [24] Jaber, S., Ajib, S. (2011). Optimum design of trombe wall system in mediterranean region. *Solar Energy*, 85, 1891-1898.

- [25] Dragicevic, S. and Lambic, M. (2011). Influence of constructive and operating parameters on a modified Trombe wall efficiency. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11(4), 825–838.
- [26] Koyunbaba, B.K. and Yilmaz, Z. (2012). The comparison of trombe wall systems with single glass, double glass and PV panels. *Renewable Energy*, 45, 111-118.
- [27] Alduaij J., Alshalch K., Haque M.N., Ellaythy K. (1999). Light weight concrete in hot coastal areas. *Cement and Concrete Composites*. 21(5–6), 453-458.
- [28] Kurama, H., Topcu, I.B., and Karakurt, C. (2009). Properties of the autoclaved aerated concrete produced from coal bottom ash. *Journal of materials processing technology*, 209, 767-773.
- [29] Huang, X.Y. et al., *Constr. Build. Mater.* 27, 1 (2012).
- [30] Koronthalyova O. (2011). Moisture storage capacity and microstructure of ceramic brick and autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, 25, 879-885.
- [31] Tao, H.S.(2004) Research for developing aerated concrete by using fly ash with high calcium of Gehua power plant in Hongshan, (WuHan:Wuhan University of Technology, China: <http://www.wuhan.gov.cn>).
- [32] สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. (2550). กองอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย. กระทรวงอุตสาหกรรม. สรุปสถานการณ์อ้อยและน้ำตาลทรายของประเทศประจำปี การผลิต 2549/50, เล่มที่2, หน้า 1-3
- [33] Cordeiro Gc, Filijp RDT, Fairbairt EMR, Luis MMT, Oliver CH, “Influence of mechanical grind on the pozzolanic activity of residual sugarcane bagasse ash”. In: *Proceedings of the International Conference on Use of Recycled Materials in Building and Structure*, Barcelona; 2004. p. 1-9.
- [34]] Singh, N.B., Singh, V.D., Rai, S. “Hydration of bagasse ash-blended Portland cement, *Cement and Concrete Research*”. 2000; 30: 1485--1488.
- [35] Ganesan, K., Rajagopal, K., Thangavel, K. “Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material”. *Cement and Concrete Composites* 2007; 29: 515–524.
- [36] ไทยคอนอินจิเนียริ่ง คอนซัลแตนท์ จำกัด. (13 ตุลาคม 2549). ข่าวสารเกี่ยวกับวัสดุก่อสร้างอิฐมวลเบา. สืบค้นเมื่อ 4 ตุลาคม 2550, จาก <http://www.thaicons.com>
- [37] กระทรวงอุตสาหกรรม. (2556). กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตมวลเบาแบบเต็มฟองอากาศ. สืบค้นเมื่อ 13 กันยายน 2558 จาก <http://www.clcprolicon.com/attachments/tis-2601-2556>

- [38] Necati ozislk.M., (1985). Heat Transfer a basic approach. New York: McGall-Hill book co-singapore.
- [39] Halman J.P., (1992). Heat Transfer. New York: McGall-Hill book co-singapore.
- [40] สำนักส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (สสอ.) กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2553ค) การปรับปรุงประสิทธิภาพ "บ้านเอื้ออาทร" โครงการระยะที่ 2 การปรับปรุงโดยปรับเปลี่ยนรูปแบบทางสถาปัตยกรรม. สืบค้นเมื่อ 20 สิงหาคม 2553, จาก http://www2.dede.go.th/new-homesafe/webban/select_electrical.pdf
- [41] สำนักส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (สสอ.) กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2553ค) แนวทางการเลือกใช้วัสดุก่อสร้าง และอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน. สืบค้นเมื่อ 20 สิงหาคม 2553, จาก http://www2.dede.go.th/new-homesafe/webban/select_electrical.pdf
- [42] Kaynakli, O., A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 415–425.
- [43] Kuznik, F. and Virgone, J. (2009). Experimental assessment of a phase change material for wall building use. Applied Energy, 88, 2038-2046.
- [44] Shilei, L., Guohui, F., Neng, Z. and Li, D.Y. (2007). Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards. Energy and Buildings, 39, 1088-1091.
- [45] Gracia, A.D., Rincón, L., et al. (2010). Life cycle assessment of the inclusion of phase change materials (PCM) in experimental buildings. Energy and Buildings, 42, 1517-1523.
- [46] โยธิน อึ้งกุล, (2554). อิทธิพลของส่วนผสมตะกอนน้ำตลต่อคุณสมบัติทางกลของชั้นส่วนคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ. วารสารวิศวกรรมลาดกระบัง, 28(3), 55-60.
- [47] บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา, ปรีดา จันทวงษ์ และโยธิน อึ้งกุล. (2553). การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของผนังคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำแบบผสมตะกอนน้ำตลและคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำภายใต้สภาวะอากาศของกรุงเทพมหานคร. วารสารวิศวกรรมลาดกระบัง, 27(4), 9-24.
- [48] วีระศักดิ์ ละอองจันทร์และคณะ, 2551, การใช้เถ้าขี้เถ้าขี้เถ้าขี้เถ้าในการพัฒนานวัตกรรมการผลิตผนังคอนกรีตมวลเบาเพื่อเป็นฉนวนกันความร้อนสำหรับอาคาร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 101 หน้า
- [49] Rahman M.A. 1987. Use of Rice Husk Ash in Sancerre Blocks for Masonry Units. Materials and Structures. 20, 361-366.
- [50] บุรฉัตร ฉัตรวีระและพิชัย นิมิตรยงสกุล 2538ค. ผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ซีเถ้าแกลบเสริมใยปาล์ม. ข้าวช่าง, 281:53-72

- [51] วชิระ แสงรัศมี. (2553) วัสดุก่อสร้างมวลเบาที่มีค่าการนำความร้อนต่ำจากส่วนผสมของเยื่อกระดาษเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตกระดาษ.มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [52] ฉานิกา จันทสระและ มนตรี รัชย์บศรี. 2543. การศึกษาคอนกรีตมวลเบาโดยใช้แกลบเป็นวัสดุผสม. รายงานการวิจัยระดับปริญญาตรีภาควิชาวิทยาศาสตร์.มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [53] ชุมพล จันทสม. 2549. การศึกษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าแกลบและซีเถ้าลอย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโครงสร้าง มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [54] อนุชิต กิจสวัสดิ์. 2522. "การทาศีเมนต์จากเถ้าแกลบ" กองกรวิจัย. กรมวิทยาศาสตร์บริการ.
- [55] บุรฉัตร ฉัตรวีระและพิชัย นิมิตรยงสกุล. 2537. คอนกรีตผสมแกลบ. วิศวกรรมศาสตร์, 47(6):77-79.
- [56] Ng SC, Low KS, Tioh NH. Newspaper sandwiched aerated lightweight concrete wall panels-Thermal inertia, transient thermal behavior and surface temperature prediction. Energy Build 2011; 43: 1636-1645.
- [57] Asan H. Effects of Wall's insulation thickness and position on time lag and decrement factor. Energy Buildings 1998; 28, 299-305.
- [58] พงศ์พันธ์ วรสุทโธรสอ. (2532). วัสดุก่อสร้าง, กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- [59] Vineet Veer Tyagi. & D. Buddhi. (2007). PCM thermal storage in buildings: A state of art. Renewable and Sustainable Energy Reviews. (11), 1146-1166.
- [60] ASTM International: (2003). Standard practice for Autoclaved Aerated Concrete, Masonry C 1555-03a. United: Annual book of ASTM Standards.
- [61] Kaynakli, O. (2009). A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 415-425.
- [62] Kuznik, F. and Virgone, J. (2009). Experimental assessment of a phase change material for wall building use. Applied Energy, 88, 2038-2046.
- [63] Shilei, L., Guohui, F., Neng, Z. and Li, D.Y. (2007). Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards. Energy and Buildings, 39, 1088-1091.
- [64] Gracia, A.D., Rincón, L., et al. (2010). Life cycle assessment of the inclusion of phase change materials (PCM) in experimental buildings. Energy and Buildings, 42, 1517-1523.
- [65] โยธิน อึ้งกุล, (2554). อิทธิพลของส่วนผสมตะกอนน้ำตาลต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ. วารสารวิศวกรรมลาดกระบัง, 28(3), 55-60.
- [66] บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา, ปรีดา จันทวงษ์ และโยธิน อึ้งกุล. (2553). การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของผนังคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำแบบผสมตะกอนน้ำตาลและคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำภายใต้สภาวะอากาศของกรุงเทพมหานคร. วารสารวิศวกรรมลาดกระบัง, 27(4), 9-24.

- [67] วีระศักดิ์ ละอองจันทร์และคณะ, 2551, การใช้เถ้าขยะชีวมวลในการพัฒนานวัตกรรมการผนังคอนกรีตมวลเบาเพื่อเป็นฉนวนกันความร้อนสำหรับอาคาร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 101 หน้า
- [68] Rahman M.A. (1987). Use of rice husk ash in sancerre blocks for masonry units. *Materials and Structures*, 20, 361-366.
- [69] บุรฉัตร ฉัตรวีระและพิชัย นิมิตรยงสกุล 2538ค. ผลผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ซีเถ้าแกลบเสริมใยปาล์ม. *ข่าวช่าง*, 281:53-72
- [70] วชิระ แสงรัมย์. (2553) วัสดุก่อสร้างมวลเบาที่มีค่าการนำความร้อนต่ำจากส่วนผสมของเยื่อ กระดาษเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตกระดาษ.มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [71] ฌานิกา จันทร์สระและ มนตรี รัชย์ศรี. 2543. การศึกษาคอนกรีตมวลเบาโดยใช้แกลบเป็นวัสดุผสม. รายงานการวิจัยระดับปริญญาตรีภาควิชาวิทยาศาสตร์.มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [72] ชุมพล จันทร์สม. 2549. การศึกษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าแกลบและซีเถ้าลอย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโครงสร้าง มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [73] อนุชิต กิจสวัสดิ์. 2522. “การทำซีเมนต์จากเถ้าแกลบ”. กองการวิจัย. กรมวิทยาศาสตร์บริการ.
- [74] บุรฉัตร ฉัตรวีระและพิชัย นิมิตรยงสกุล. 2537. คอนกรีตผสมแกลบ. *วิศวกรรมศาสตร์*, 47(6):77-79



Article

Thermal Effectiveness Enhancement of Autoclaved Aerated Concrete Wall with PCM-Contained Conical Holes to Reduce the Cooling Load

Atthakorn Thongtha ^{1,*}, Aitthi Khongthon ¹, Thitinun Boonsri ¹ and Chan Hoy-Yen ²

¹ Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok 65000, Thailand

² ASEAN Centre for Energy, Kota Jakarta Selatan, Daerah Khusus Ibukota Jakarta, 12950, Indonesia

* Correspondence: atthakornt@nu.ac.th; Tel.: +665-596-3550

Received: 8 June 2019; Accepted: 3 July 2019; Published: 6 July 2019

check for updates

Abstract: This work investigates and improves the thermal dynamics of autoclaved aerated concrete (AAC) wall containing phase change material (PCM). The PCM is paraffin wax loaded into conical holes drilled into the AAC. Filled AAC with three different numbers of PCM-filled holes (2, 3, and 4 conical holes, which are designated as AAC-2H, AAC-3H, and AAC-4H, respectively) as well as the unfilled original AAC were both tested under two different conditions: indoors (with controlled temperature) and outdoors (with actual weather). For the indoor experiment, a heater was used as a thermal source and set up to maintain the testing temperature at one of three levels: 40 °C, 50 °C, or 60 °C. The wall temperature was then measured on the surface with each horizontally-positioned wall as well as four different positions at various depths below the surface of the wall. It was found that AAC-4H was the optimum condition, which can produce outstandingly a time lag of approximately 27%, reduce a decrement factor of approximately 31%, and also decrease the room temperature. This reached approximately 9% when compared with that of ordinary AAC at the controlled testing temperature of 60 °C. All samples were further tested in actual weather to confirm the thermal performances of AAC-4H. Thermal effectiveness of AAC-4H was improved by extending approximately a 14.3% time lag, which reduces approximately a 4.3% decrement factor and achieving approximately 5% lower room temperature when compared with ordinary AAC.

Keywords: autoclaved aerated concrete; insulation materials; phase change material; conical hole; cooling load; energy saving

1. Introduction

Electricity consumption worldwide in the building sector has grown from 26% in 1980 to 54% in 2010, and is forecasted to be 84% in 2050 [1,2]. The electricity consumption in the building sector is due mainly to the air conditioning system and mechanical ventilation to obtain indoor thermal comfort. Up to approximately 64% of the electricity consumption in South Asia is due to air conditioning because of the hot weather in the region all year round [1,2]. Building cooling systems in high solar radiation areas are high energy consumers. Therefore, research is being done on the building envelope to decrease thermal accumulation in buildings [3–6].

Currently, concrete is widely used as an important construction material in residential housing, public buildings, offices, and thermal energy storage materials. To reduce the environmental impact, and improve mechanical and thermal properties during concrete production, G.L. Golewski [7,8] used fly ash as a component of concrete to decrease fly ash landfills by 160 million tons. This usage helped reduce the environmental impact, and improve the mechanical properties of the concrete. Furthermore, the thermal properties of the concrete were improved, which enables its use as a thermal energy storage material in solar-thermal power plants [9–11].

In residential housing, the application of new concrete types in the building envelope, to decrease heat gain, is key to reducing energy consumption. These new materials are required to improve building designs to reduce energy consumption. One of the approaches for reducing energy consumption in buildings and improving interior thermal surroundings is the integration of phase change material (PCM) into a building or building services system, which was first applied for thermal storage in buildings in 1980 [12], to improve the efficiency of thermal storage [13,14]. Experiments that used PCMs in trombe walls [15,16], wall boards [17,18], shutters or windows [19], ceiling boards [20,21], and roofs [22–24] have reported reduced energy consumption.

For the efficiency of thermal storage, metal foams were incorporated into PCM to increase the potential of thermo-mechanical properties for high temperature thermal energy storage [14]. Zhou and Pang [15] enhanced the thermal behavior of a PCM in Trombe wall systems for passive solar heating by using longitudinal vortex generators, which can improve the gap air flow rate of around 28.5% and a heating rate of around 39.4% to the room when compared with the condition without vortex generators. Li et al. improved the thermal performance of the Trombe wall integrated with double layers of phase change materials that can enhance indoor thermal comfort and reduce the cooling/heating load over the whole year [16]. PCM composite board with the incorporation of shape-stabilized PCM particles in a polymer matrix applied to the thermal insulation that showed optimized performances during the summer, while exhibiting a very poor choice during the winter [17]. Furthermore, the gypsum board when incorporating 45% by weight of PCM increased heat storage capacity and decreased energy consumption [18]. Li et al. incorporated paraffin wax with added nanoparticles into double glazed windows and obtained the condition of nanoparticle concentration of 1% and nanoparticle diameter of 100 nm met minimal energy consumption for all seasons [19]. Yasin et al. made the chilled PCM ceiling model by simulating massive thermo-active building elements with PCM, which corresponded to the real scale building data [20]. Next, PCM was used in buildings with a ceiling fan-assisted ventilation system to improve indoor thermal comfort and to shift cooling/heating energy demand away from peak hours [21]. Chou et al. improved the metal-sheet roofing structure by using PCM, which can reduce heat transfer through the roof to the indoor space and maintain indoor comfort for longer [22]. Lei et al. investigated passive cooling strategies with a cool colored coating and PCM that increased the effectiveness throughout the whole year while reducing a cooling energy consumption by 8.5% [23]. Furthermore, Alawadhi et al. revealed that the cement roof with PCM-contained conical geometry is thermally the most effective reducing heat flux by approximately 39% [24].

In Thailand, around 28,400,000 m² Autoclaved Aerated Concrete (AAC) was utilized in 2013. Its popularity was due to its lightweight, highly porous structure, higher thermal resistance, lower thermal conductivity, and faster building process than traditional concrete [25–29]. Of further importance, AAC shows an energy consumption saving of approximately 50%. To enhance sufficiently the thermal efficiency of AAC, the integration of phase change material (PCM) into AAC wall material was considered to reduce the propagation from the exterior surface to the interior surface. Importantly, the AAC walls with the PCM-filled conical geometry have previously not been studied. This work, therefore, concentrated on testing the further thermal performance of the AAC, by the application of various PCM-filled conical holes, to meet the best thermal performance.

2. Materials and Methods

2.1. Analysis of Behavior and Application of Phase Change Material

The thermal behavior of the paraffin PCM was examined using a differential scanning calorimeter (DSC) to investigate the material's endothermic and exothermic peaks. Conical holes to contain the PCM were drilled into the upper surface of flat lying squares of AAC (60 cm × 60 cm × 20 cm), with the upper surface representing the future building exterior. The AAC used had a dry density of 0.61 g/cm³, a compressive strength of approximately 5.5 N/mm², and water absorption per volume of 0.40 g/cm³. All values are based on Quality Class 4 of the Thai Industrial Standard (1505–1998). AAC samples were

modified with 2, 3, or 4 PCM-filled conical holes (referred to as AAC-2H, -3H and -4H, respectively) in order to test each modification's thermal performance.

2.2. Testing the Thermal Behavior of the AAC Modifications under Controlled Temperature Versus with Actual Weather

Figures 1 and 2 show the experimental installation used to test the time lag and decrement factors of AAC, AAC-2H, AAC-3H, and AAC-4H. Each location of different thickness of original AAC, AAC-2H, AAC-3H, and AAC-4H was tested at the temperatures of 40 °C, 50 °C, and 60 °C by controlling a thermal source (heater) to observe time lag and decrement factors. This temperature range was considered as the wall temperature of most buildings in Thailand, which is in the range of 40 to 60 °C [29].

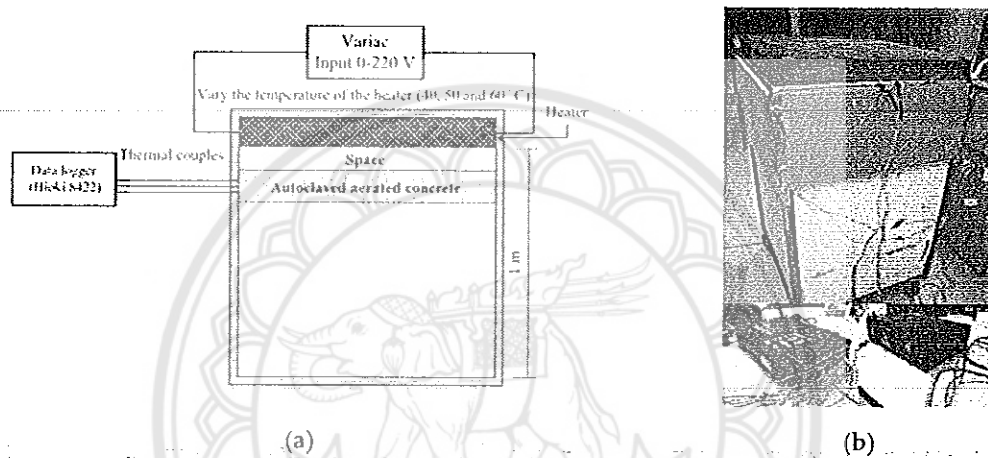


Figure 1. (a) Schematic diagram of the experimental set up. (b) View of the testing room and instrument installation.

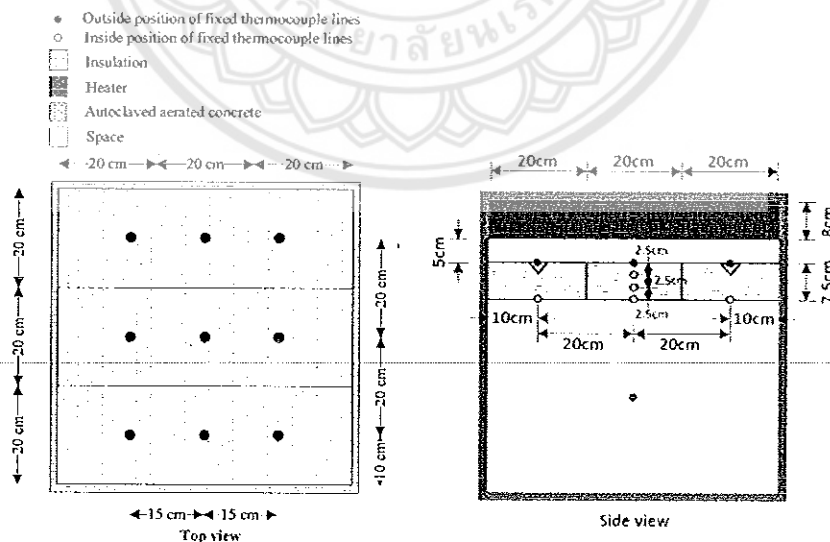


Figure 2. Fixed locations of thermal couples set for testing the time lag and decrement factor of samples.

The following experiment was conducted under natural weather conditions, rather than simulated conditions. The effectiveness of the AAC was studied using four experimental rooms, as shown in Figure 3. The four test rooms were built 0.24 m³ in volume and the six wall sides (comprised of an area of 0.38 m²). One side of each testing room was constructed using various wall material types such

as ordinary AAC, AAC-2H, AAC-3H, and AAC-4H. The other side of each testing room used Poly Ethylene insulation on the testing room wall. Ambient temperature, room temperature, and exterior and interior surfaces temperature were measured and recorded at 5-min intervals and continuously over 24 h. A pyranometer was set in the outdoor area to measure solar radiation intensity. Wind speed was recorded using a wind anemometer.

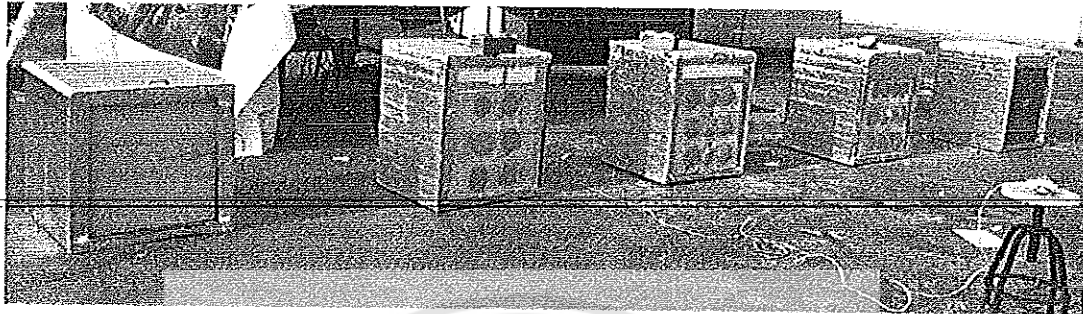


Figure 3. View of the testing rooms with different conical holes in real weather.

3. Results

3.1. Phase Change Material Behavior

The endothermic and exothermic peaks of phase change material as paraffin are shown in Figure 4. Temperature range from 0 °C to 90 °C was considered to investigate the melting and solidification point of paraffin. There are two endothermic peaks distinctively appeared in the temperature range of 0 °C to 90 °C. The first small endothermic peak was presented at approximately 41.5 °C with an involved enthalpy of 22.13 J/g, which is related to the starting state of paraffin melting. Next, there was an increase in temperature to 90 °C, a second broadening endothermic peak with an enthalpy of 137.67 J/g around 59 °C that was related to the process of the molten paraffin and continued from the first endothermic peak. Moreover, the two exothermic peaks were observed at approximately 58.5 °C and 40 °C when the temperature dropped from 90 °C to 0 °C. The first exothermic peak showed the enthalpy of 131.35 J/g because of the solidification process of some contents of paraffin. The enthalpy of 11.25 J/g was observed in the second small exothermic peak, which was related to the solidification due to heat discharge. This indicated that the condition of temperature range for the melting point, solidification point, and thermal storage capacity of paraffin PCM was suitable for the PCM integration investigation into autoclaved aerated concrete.

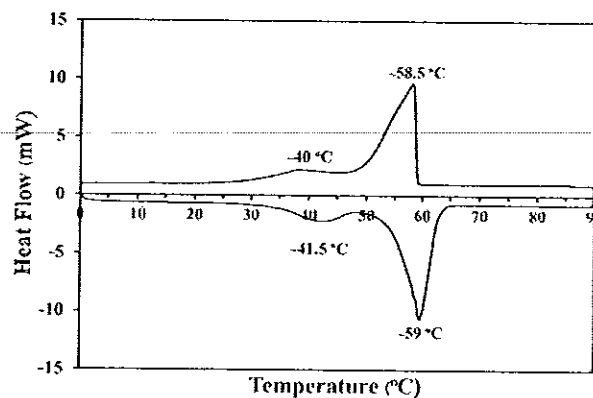


Figure 4. DSC plots showing the melting point of PCM.

3.2. Time-Lag and Decrement Factor Measurement

The wall temperature (T_w), the time lag (ϕ), decrement factor (f), and the room temperature (T_R) of AAC with different PCM-filled conical holes in each temperature condition are shown in Tables 1 and 2. When controlling the temperature of 40 °C, the temperature in each position fluctuated, as shown in Figure 5. The exterior wall surface temperature ($T_{w,0}$), wall temperature at the thickness of 25 mm ($T_{w,25}$), wall temperature at the thickness of 50 mm ($T_{w,50}$), interior wall surface temperature ($T_{w,75}$), and room temperature (T_R) was observed as the temperature revolution for 360 min in each condition. When the testing time was more than 180 min, the trend of wall temperature in each location was steady. The temperature value was longer than 180 min, which will be calculated to receive the average temperature in each AAC position. For the sample condition of AAC-2H, the average temperatures of $T_{w,0}$, $T_{w,25}$, $T_{w,50}$ and $T_{w,75}$ were around 43.3, 39.2, 35.0, and 31.7 °C, respectively (as shown in Figure 5 and Table 1). This illustrated that the greater thickness of AAC led to lower temperature. The average temperatures of other AAC samples at different locations were similar to that of the AAC-2H, as listed in Table 1.

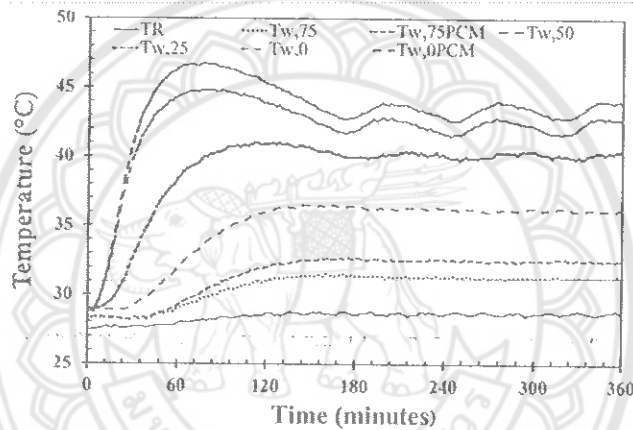


Figure 5. Temperature evolution of AAC wall with the two PCM-filled conical holes at 40 °C.

Table 1. Average wall temperature of AAC.

Temperature (°C)	x (mm)	Average Wall Temperature (°C)			
		AAC	AAC-2H	AAC-3H	AAC-4H
40	0	43.1	43.3	42.6	42.4
	25	38.8	39.2	38.6	38.2
	50	33.9	35.0	34.6	34.1
	75	30.9	31.7	30.9	30.8
50	0	48.8	48.9	48.1	47.2
	25	43.3	43.1	44.3	43.5
	50	36.9	37.0	39.1	37.2
60	0	50.5	55.7	52.5	49.2
	25	45.5	48.6	46.7	46.2
	50	38.7	40.8	40.0	38.2
	75	33.8	34.8	33.5	31.2

Table 2. Average decrement factor of AAC.

Temperature (°C)	x (mm)	Decrement Factor			
		AAC	AAC-2H	AAC-3H	AAC-4H
40	0	0	0	0	0
	25	0.328	0.443	0.383	0.356
	50	0.133	0.378	0.102	0.178
	75	0.129	0.195	0.054	0.089
50	0	0	0	0	0
	25	0.329	0.293	0.236	0.302
	50	0.230	0.133	0.088	0.147
	75	0.176	0.090	0.042	0.099
60	0	0	0	0	0
	25	0.302	0.326	0.418	0.254
	50	0.181	0.114	0.208	0.127
	75	0.085	0.060	0.097	0.059

The time lag (Φ) and the decrement factor (f) [30,31] are determined by the following equations (Equations (1) and (2)).

$$\Phi = \tau_{q_{i,max}} - \tau_{q_{e,max}} \quad (1)$$

$$f = \frac{A_i}{A_e} = \frac{q_{i,max} - q_{i,min}}{q_{e,max} - q_{e,min}} \quad (2)$$

where $\tau_{q_{i,max}}$ is the times at the maximum interior wall surface heat flux and $\tau_{q_{e,max}}$ is the times at the maximum exterior wall surface heat flux. A_i is the wave amplitudes in the inner wall surface and A_e is the amplitudes of the wave in the outer wall surfaces. $q_{i,max}$, $q_{i,min}$, $q_{e,max}$, and $q_{e,min}$ are the maximum and the minimum heat flux of the interior and exterior wall surface, respectively.

When the heat source was fixed at the temperature of 60 °C, the time lag of AAC increased from 34 to 90 min with an increase of AAC thickness from 0 to 75 mm, as shown in Table 3. For the case of AAC-2H, AAC-3H, and AAC-4H, the time lag also increased with the growth in wall thickness from 0 to 75 mm, as given in Table 3. With the thickness of 75 mm, the time lag of AAC with the 2, 3, and 4 PCM-filled conical holes is at around 90, 58, 52, and 114 min, respectively. This shows that the time lag of AAC-4H increased to around 26.7%, 96.5%, and 119.2% when compared with that of AAC, AAC-2H, and AAC-3H.

Table 3. Time lag (Φ) of AAC wall with different PCM conical holes.

Type of AAC	Time Lag (Φ) at Different Thicknesses (min)			
	0 mm	25 mm	50 mm	75 mm
AAC	0	34	78	90
AAC-2H	0	14	52	58
AAC-3H	0	16	44	52
AAC-4H	0	16	48	114

For the decrement factor of ordinary AAC at the controlled temperature of 40 °C, the value reduced from 0.328 to 0.129 with an increase of AAC wall thickness from 0 to 75 mm. In the case of controlling the temperatures of 50 °C and 60 °C, the trend of the decrement factor at the testing temperature of 50 °C and 60 °C was similar to that of the testing temperature of 40 °C when the AAC wall thickness increased from 0 to 75 mm, as illustrated in Table 2. For considering the decrement factor of AAC-2H, AAC-3H, and AAC-4H, its value decreased with higher wall thickness from 0 to 75 mm, as exhibited in Table 2. This demonstrated that an increase of AAC wall thickness is related to a reduction of the decrement factor.

The time lag of AAC-4H was the longest and the decrement factor of AAC-4H was the lowest when compared with the ordinary AAC, AAC-2H, AAC-3H, and AAC-4H in each condition. This is indicated with the AAC-4H, which can insignificantly expand the time for the heat transfer from the exterior wall surface to the interior wall surface and distinctly reduces the heat wave amplitudes. This leads to a lower room temperature for AAC-4H at approximately 1 to 3 °C when compared with that of the ordinary AAC and AAC-2H and AAC-3H, which expresses the consequence of the expanded time lag, as given in Table 4.

Table 4. Average room temperature of the AAC wall with different PCM conical holes.

T(°C)	Average Room Temperature (°C)			
	Ordinary AAC	AAC-2H	AAC-3H	AAC-4H
40	28.5	28.5	29.1	28.7
50	29.3	29.4	30.0	27.2
60	29.4	30.0	30.1	26.7

To investigate the thermal behaviors of the ordinary AAC, AAC-2H, AAC-3H, and AAC-4H in real weather, the four testing rooms with different conical AAC types was concurrently tested from the midnight of the day to the midnight of the following day, which gives a 24-h test cycle (October 6, October 9, October 13, and October 17–18, 2018). The evolution in solar radiation, surrounding temperature, interior wall surface temperature, exterior wall surface temperature, and room temperature evolution of the four trialing rooms were examined and compared, as illustrated in Figures 6–14.

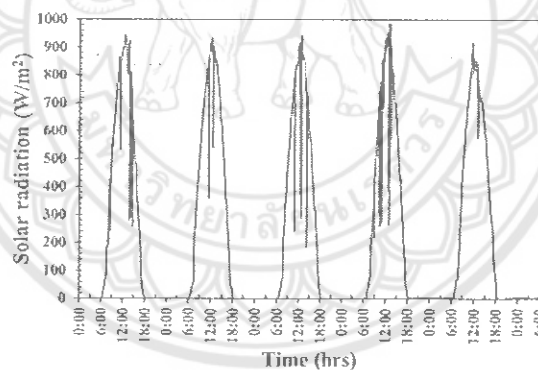


Figure 6. The fluctuation of solar radiation.

To investigate the thermal behaviors of the ordinary AAC, AAC-2H, AAC-3H, and AAC-4H in real weather, the four testing rooms with different conical AAC types was concurrently tested from midnight of one day to midnight of the following day, giving a 24-h test cycle (October 6, October 9, October 13, and October 17–18, 2018). The evolution in solar radiation, surrounding temperature, interior wall surface temperature, exterior wall surface temperature, and room temperature evolution of the four trialing rooms were examined and compared, as illustrated in Figures 6–14.

The periodical cloud leads to the swinging nature of solar radiation in the tropic that is regular between sunrise (6.00 a.m.) and sunset (6.00 p.m.) with the maximum solar radiation intensity value of about 0.948 kW/m² at around midday, as shown in Figure 6. Wind speed in testing the surrounding area is between 0.15 and 3.70 m/s. The surrounding temperature is affected from the weather conditions. The surrounding temperature fluctuated between ~27 °C in the morning between 5–6 a.m. and rose the maximum value by approximately 43 °C at around 3 p.m.

The temperature evolution of the ordinary AAC testing room wall is shown in Figure 7. The average maximum exterior wall surface temperature, average maximum interior wall temperature,

3:00 p.m., respectively, and then decreased in value over time passed after each of those times. The average exterior surface temperature, average interior wall temperature, average room temperature, and average ambient temperature for 5 days were approximately 35.5 °C, 34.0 °C, 33.5 °C, and 32.0 °C, as observed from midnight of one day to midnight of the following day, giving observations for 24 h in each day.

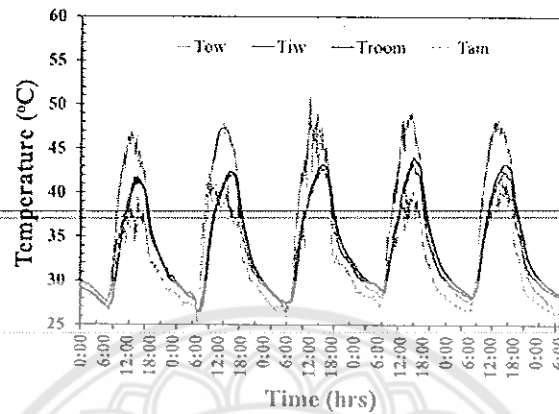


Figure 9. Temperature fluctuation of the AAC-3H testing room wall.

The temperature fluctuations of the AAC-4H testing room wall is displayed in Figure 10. The average maximum exterior wall temperature, average maximum interior wall temperature, average maximum room temperature, and average maximum ambient temperature throughout 5 days reached as high as approximately 53.1 °C, 43.4 °C, 42.0 °C, and 43.3 °C at around 12:00 p.m., 2:35 p.m., 3:15 p.m., and 3:00 p.m., respectively, and then decreased in value over time passed after each of those times. The average exterior surface temperature, average interior wall temperature, average room temperature, and average ambient temperature for 5 days were at approximately 36.8 °C, 34.4 °C, 32.5 °C, and 32.0 °C were observed throughout a day from midnight of one day to midnight the following day, giving 24-h observations in each day.

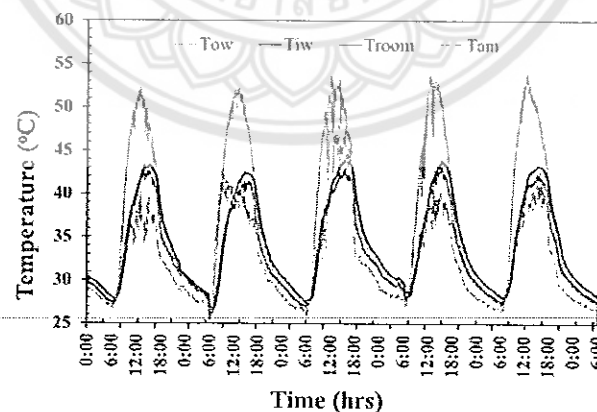


Figure 10. Temperature fluctuation of the AAC-4H testing room wall.

Figure 11 exhibits the evolution of the exterior and interior wall surface temperature of the ordinary AAC, AAC-2H, AAC-3H, and AAC-4H in real weather. It is noted that the exterior surface temperatures of all testing rooms drastically increase from 6:00 a.m. onwards to 11:40 a.m., as presented in Figure 11a. The average maximum exterior wall temperature of the ordinary AAC, AAC-2H, AAC-3H, and AAC-4H in each day was at approximately 50.9 °C, 51.6 °C, 48.2 °C, and 53.1 °C during the time of 12:10 to 12:30 p.m., respectively. The average maximum interior wall surface temperature

of the ordinary AAC, AAC-2H, AAC-3H, and AAC-4H was at approximately 43.0 °C, 44.3 °C, 42.5 °C, and 43.4 °C at around 3 p.m. (as shown in Figure 11b), respectively.

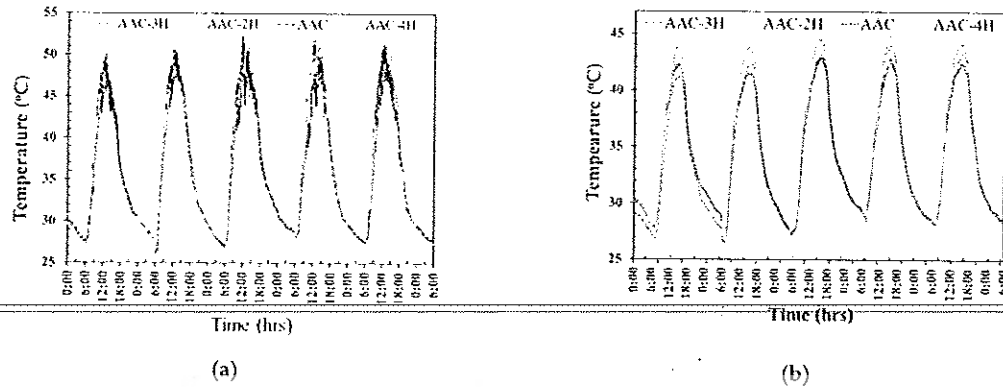


Figure 11. (a) exterior and (b) interior wall surface temperature of the 4 testing rooms in real weather.

Gradient of temperature on both the inner and outer wall surfaces of the four testing rooms was studied over 5 days, as illustrated in Figure 12. The temperature gradient on the wall surface is positive when temperature at the outer wall surface is higher than that of the interior surface, while the gradient of the temperature on the wall surface is negative when the temperature at the outer surface position is less than that of the interior surface location.

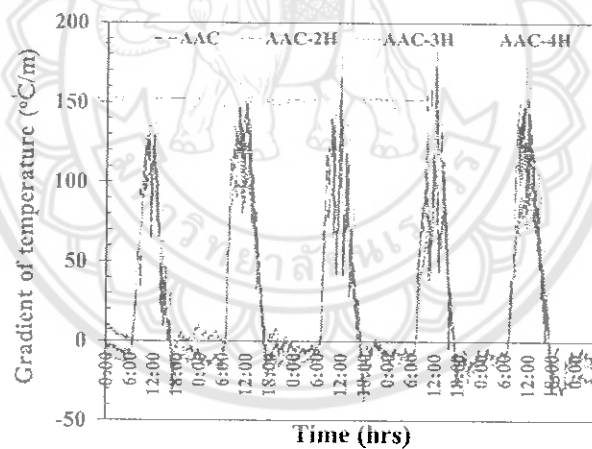


Figure 12. Evolution of gradient of temperature of the 4 testing rooms.

With the temperature gradient of the ordinary AAC, AAC-2H, AAC-3H, and AAC-4H testing room walls, a positive-temperature gradient throughout the 5 days was first increased and reached its highest average value of around 156 °C/m, 137 °C/m, 110 °C/m, and 169 °C/m around midday and then dropped in value as time passed. The maximum negative value of the ordinary AAC, AAC-2H, AAC-3H, and AAC-4H wall was observed at about 25.2 °C/m, 32.0 °C/m, 17.7 °C/m, and 18.7 °C/m at around 6:00 p.m. This shows that the maximum positive gradient temperature of the AAC-4H wall was higher than that of an ordinary AAC, AAC-2H, and AAC-3H testing room wall, which is at around 13 °C/m, 32 °C/m, and 59 °C/m, respectively. The maximum positive temperature gradient of AAC-4H increased to around 8%, 23%, and 54% when compared with that of the ordinary AAC, AAC-2H, and AAC-3H, as shown in Figure 13. This demonstrates that the 4 PCM-filled conical holes can clearly increase the temperature difference between the exterior and interior wall surface, and between the exterior surface and room temperature, which is related to a reduction of the heat flow through the exterior wall surface to the interior wall surface. This indicates the greater insulative efficiency of AAC

with the optimum PCM-contained conical hole, and implies the achievement of energy consumption saving from cooling loads in buildings. This is clearly a significant result.

Figure 14 presents the evolution of room temperature with different AAC wall patterns. The four testing rooms were observed between midnight of one day to midnight the following day. The swing nature of solar radiation, surrounding temperature, and exterior and interior surface temperature evolution affected room temperature, which varied over the day. This was seen in the room temperature of the four testing rooms, which were approximately equal between the times of 6:00 a.m. and 11:30 a.m. After that time, different peak temperatures were reached in each testing room at different times. After 11:40 a.m., the temperature readings diverged. The room temperature of AAC, AAC-2H, AAC-3H, and AAC-4H walls rose more rapidly, and achieved the highest peak value of around 43.0 °C, 43.5 °C, 42.6 °C, and 42.0 °C, at about 3:15 p.m. It was observed that the AAC-4H testing room temperature is lower than that of the AAC, AAC-2H, and AAC-3H at around 1.0 °C, 1.5 °C, and 0.6 °C, respectively. Moreover, the average room temperature throughout the 5 days of the ordinary AAC, AAC-2H, AAC-3H, and AAC-4H testing room wall is at approximately 34.2 °C, 33.8 °C, 33.5 °C, and 32.5 °C, respectively. This indicates that the use of AAC with 4 PCM-contained conical holes is the optimum condition that can significantly reduce the daily room-temperature fluctuation gap. The daily room temperature swing was reduced from 15.6 °C, 15.0 °C, and 14.8 °C in the AAC room, the AAC-2H room, and the AAC-3H room to only 13.5 °C in the AAC-4H, which results from sufficient thermal absorption of the AAC-4H. This is close to the exterior surface wall. This demonstrates a decrease of heat propagation from the exterior surface to the interior surface as well as into the interior area of the testing room.

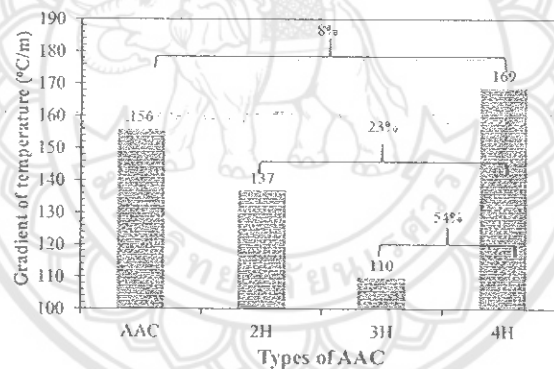


Figure 13. Comparison of gradient temperature of the 4 testing rooms.

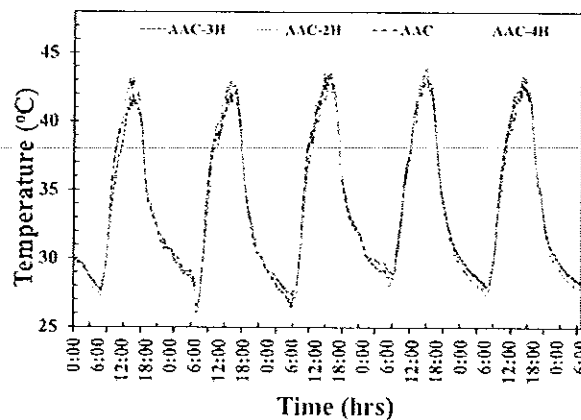


Figure 14. Room temperature of the 4 testing rooms in real weather.

The heat flux time lag and decrement factor of the real weather conditions are determined by Equations (1) and (2). The average time lag of the original AAC, AAC-2H, AAC-3H, and AAC-4H for 5 days is at approximately 161 min, 147 min, 154 min, and 184 min and the average decrement factor of the AAC, AAC-2H, AAC-3H, and AAC-4H for 5 days is at around 0.625, 0.666, 0.731, and 0.598, respectively. This demonstrates that the samples of AAC-4H can increase the time of the transfer of the heat wave and distinctly reduces its amplitude ratio of the heat wave during this process. Considering the heat flux time lag and decrement factor comparison of AAC, AAC-2H, and AAC-3H, the 14.3%, 25.2%, and 19.5% heat flux time lag of AAC-4H was extended while the 4.3%, 10.2%, and 18.2% decrement factor of AAC-4H was reduced, respectively. This affects the room temperature of AAC-4H, which was approximately 1.7 °C, 1.3 °C, and 1 °C lower than that of the AAC, AAC-2H, and AAC-3H, which indicates the influence from an extension of the time lag, as demonstrated in Table 5. This clearly indicates that the optimum conical holes of AAC demonstrate better insulating properties, which leads to a decay of heat transmission loads. This lower room temperature and lower daily room temperature fluctuation of AAC-4H leads to obtaining energy savings in buildings and a significant decline of the yearly peak cooling requirement.

Table 5. Time lag and decrement factor of the 4 testing rooms.

Material Types	Time Lag (min)						Decrement Factor					
	1st	2nd	3rd	4th	5th	Avg.	1st	2nd	3rd	4th	5th	Avg.
AAC	156	140	174	166	170	161	0.679	0.600	0.605	0.617	0.622	0.625
AAC-2H	150	110	165	160	148	147	0.688	0.665	0.660	0.661	0.653	0.666
AAC-3H	160	144	170	150	160	154	0.736	0.757	0.714	0.726	0.722	0.731
AAC-4H	170	160	220	190	180	184	0.625	0.594	0.604	0.595	0.571	0.598

4. Conclusions

The thermal properties of autoclaved aerated concrete were also improved by the incorporation of phase change material. AAC with the phase change material filled four conical holes, which was the optimal condition. This can produce a time delay in the heat transfer of approximately 27%, reduce the decrement factor of around 31%, and also decreases the room temperature to around 9% when compared with conventional AAC at the controlled temperature of 60 °C. In the real weather, the AAC-4H showed thermal effectiveness by extending the time lag of approximately 14.3%, which reduces the decrement factor by approximately 4.3% and achieves approximately 5% lower room temperature when there is a comparison with the ordinary AAC. The time lag extension, decrement factor reduction, and lower room temperature resulted in the reduction of the cooling load of the testing room and more savings of electricity. This demonstrates an improvement of insulating properties corresponding to a reduction of heat wave propagation and an accomplishment of the lower room temperature, which leads to energy conservation in buildings.

Author Contributions: Conceptualization, A.T.; methodology, A.T., A.K., T.B. and C.H.-Y.; formal analysis, A.T., A.K. and T.B.; investigation, A.T., A.K. and T.B.; data curation, A.T.; writing—original draft preparation, A.T., A.K., T.B. and C.H.-Y.; writing—review and editing, A.T.; visualization, A.T.; supervision, A.T.; project administration, A.T.; funding acquisition, A.T.

Funding: This research was funded by the National Research Council of Thailand, grant number R2562B053.

Acknowledgments: The authors would like to thank the Thailand Research Fund (TRF), Faculty of Science, Naresuan University, and INSEE Superblock Company Limited for providing financial support to this research work, and our research center. Thanks are given to Kyle V. Lopin and Kevin Roebel for editing this document.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

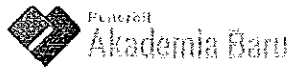
References

1. Ürge-Vorsatz, D.; Cabeza, L.F.; Serrano, S.; Barreneche, C.; Petrichenko, K. Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2015**, *41*, 85–98. [CrossRef]
2. Ürge-Vorsatz, D.; Petrichenko, K.; Staniec, M.; Eom, J. Energy use in buildings in a long-term perspective. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* **2013**, *5*, 141–151. [CrossRef]
3. Chan, A.L.S.; Chow, T.T. Evaluation of Overall Thermal Transfer Value (OTTV) for commercial buildings constructed with green roof. *Appl. Energy* **2013**, *107*, 10–24. [CrossRef]
4. Yang, I.J.; Yang, E.H. Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for cooling load reduction in tropical Singapore. *Appl. Energy* **2016**, *162*, 207–217.
5. Levinson, R.; Berdahl, P.; Akbari, H.; Miller, W.; Joedicke, I.; Reilly, J.; Suzuki, Y.; Vondran, M. Methods of creating solar-reflective nonwhite surfaces and their application to residential roofing materials. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2007**, *91*, 304–314. [CrossRef]
6. Nahar, N.M.; Sharma, P.; Purohit, M.M. Performance of different passive techniques for cooling of buildings in arid regions. *Build. Environ.* **2003**, *38*, 109–116. [CrossRef]
7. Golewski, G.I. The influence of microcrack width on the mechanical parameters in concrete with the addition of fly ash: Consideration of technological and ecological benefits. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *197*, 849–861. [CrossRef]
8. Golewski, G.I. An assessment of microcracks in the Interfacial Transition Zone of durable concrete composites with fly ash additives. *Compos. Struct.* **2018**, *200*, 515–520. [CrossRef]
9. Pan, J.; Zou, R.; Jin, F. Experimental study on specific heat of concrete at high temperatures and its influence on thermal energy storage. *Energies* **2017**, *10*, 33. [CrossRef]
10. Ogrodnik, P.; Zegardlo, B.; Szelag, M. The use of heat-resistant concrete made with ceramic sanitary ware waste for a thermal energy storage. *Appl. Sci.* **2017**, *7*, 1303. [CrossRef]
11. Wu, C.; Pan, J.; Zhong, W.; Jin, F. Testing of high thermal cycling stability of low strength concrete as a thermal energy storage material. *Appl. Sci.* **2016**, *6*, 271. [CrossRef]
12. Sharma, A.; Tyagi, V.V.; Chen, C.R.; Buddhi, D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2009**, *13*, 318–345. [CrossRef]
13. Farid, M.M.; Khudhair, A.M.; Razack, S.A.K.; Al-Hallaj, S. A review on phase change energy storage: Materials and applications. *Energy Convers. Manag.* **2004**, *45*, 1597–1615. [CrossRef]
14. Fernandes, D.; Pitió, F.; Cáceres, G.; Baeyens, J. Thermal energy storage: How previous findings determine current research priorities. *Energy* **2012**, *39*, 246–257. [CrossRef]
15. Zhou, G.B.; Pang, M.M. Experimental investigations on thermal performance of phase change material–Trombe wall system enhanced by delta winglet vortex generators. *Energy* **2015**, *93*, 758–769. [CrossRef]
16. Li, S.S.; Zhu, N.; Hu, P.F.; Lei, F.; Deng, R. Numerical study on thermal performance of PCM trombe wall. *Energy Procedia* **2019**, *158*, 2441–2447. [CrossRef]
17. Omari, K.E.; Guer, Y.L.; Bruel, P. Analysis of micro-dispersed PCM-composite boards behavior in a building's wall for different seasons. *J. Build. Eng.* **2016**, *7*, 361–371. [CrossRef]
18. Oliver, A. Thermal characterization of gypsum boards with PCM included: Thermal energy storage in buildings through latent heat. *Energy Build.* **2012**, *48*, 1–7. [CrossRef]
19. Li, D.; Wu, Y.; Liu, C.; Zhang, G.; Anqi, M. Energy investigation of glazed windows containing Nano-PCM in different seasons. *Energy Convers. Manag.* **2018**, *172*, 119–128. [CrossRef]
20. Yasin, M.; Scheidemantel, E.; Klinker, R.; Weinsläder, H.; Weismann, S. Generation of a simulation model for chilled PCM ceilings in TRNSYS and validation with real scale building data. *J. Build. Eng.* **2019**, *22*, 372–382. [CrossRef]
21. Alizadeh, M.; Sadrameli, S.M. Indoor thermal comfort assessment using PCM based storage system integrated with ceiling fan ventilation: Experimental design and response surface approach. *Energy Build.* **2019**, *188–189*, 297–313. [CrossRef]
22. Chou, H.M.; Chen, C.R.; Nguyen, V.L. A new design of metal-sheet cool roof using PCM. *Energy Build.* **2013**, *57*, 42–50. [CrossRef]

23. Lei, J.W.; Kumarsamy, K.; Zingre, K.T.; Yang, J.; Wan, M.P.; Yang, E.H. Cool colored coating and phase change materials as complementary cooling strategy for building cooling load reduction in tropics. *Appl. Energy* **2017**, *190*, 57–63. [CrossRef]
24. Alawadhi, M.E.; Alqallaf, H.J. Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: Numerical study. *Energy Convers. Manag.* **2011**, *52*, 2958–2964. [CrossRef]
25. Koronthalyova, O. Moisture storage capacity and microstructure of ceramic brick and autoclaved aerated concrete. *Constr. Build. Mater.* **2011**, *25*, 879–885. [CrossRef]
26. Kurama, H.; Topcu, I.B.; Karakurt, C. Properties of the autoclaved aerated concrete produced from coal bottom ash. *J. Mater. Process. Technol.* **2009**, *209*, 767–773. [CrossRef]
27. Cai, L.X.; Ma, B.G.; Li, X.G.; Yang, L.; Liu, Z.L.; Jian, S.W. Mechanical and hydration characteristics of autoclaved aerated concrete (AAC) containing iron-tailings: Effect of content and fineness. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *128*, 361–372. [CrossRef]
28. Thongtha, A.; Maneewan, S.; Punlek, C.; Ungkoon, Y. Investigation of the compressive strength, time lags and decrement factors of AAC-lightweight concrete containing sugar sediment waste. *Energy Build.* **2014**, *84*, 516–525. [CrossRef]
29. Punlek, C.; Maneewan, S.; Thongtha, A. Phase change material coating on autoclaved aerated lightweight concrete for cooling load reduction. *Mater. Sci.* **2017**, *23*, 145–149. [CrossRef]
30. Ng, S.C.; Low, K.S.; Tioh, N.H. Newspaper sandwiched aerated lightweight concrete wall panels-Thermal inertia, transient thermal behavior and surface temperature prediction. *Energy Build.* **2011**, *43*, 1636–1645. [CrossRef]
31. Asan, H. Effects of wall's insulation thickness and position on time lag and decrement factor. *Energy Build.* **1998**, *28*, 299–305. [CrossRef]



© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Efficiency of Electricity Production from Installed Generator on a Condensing Unit of an Air Conditioner

Open
Access

Chanita Mano¹, Atthakorn Thongtha^{1,*}

¹ Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 February 2019

Received in revised form 12 May 2019

Accepted 2 June 2019

Available online 15 August 2019

ABSTRACT

This research investigated the efficiency of a generator installed on a condensing unit to produce electricity on a split air conditioner. A rectangle-shaped or a circular-shaped hood was set up to increase the wind speed coming out of the condensing unit. A DC generator with a capacity of 24 Volts and 300 Watts was operated at the end of each hood to produce electricity. All experiments were performed using a split-typed air conditioner within a 3.0 m X 3.0 m X 2.6 m room. The air conditioner was set to 25 °C in the cool mode with the fan speed set to level 5. The results showed that the average air ventilation speed of the condensing unit, the end of rectangle-shaped hood and the end of circle-shaped hood is at approximately 7.6, 12.4 and 12.5 m/s, respectively. The electrical generator operated just outside of the normal condensing unit, the end of rectangle-shaped hood and the end of circle-shaped hood had a voltage of 7.9, 15.6 and 16.1 V, and daily average electricity of 491.8, 1951.9 and 2071.6 W-hr was produced, respectively. To investigate the COP and EER, 4 cases were used: the normal condensing unit, installation of the electrical generator, installation of rectangle-shaped hood and the electrical generator, and installation of circle-shaped hood and the electrical generator. Coefficient of performance in each case was 4.1, 4.1, 4.1 and 4.1, and the energy efficiency ratio of the 4 cases was 14.0, 14.0, 14.0 and 14.0 BTU/W-hr, respectively. The installation of the rectangle-shaped and circle-shaped hoods can increase the potential of the electrical energy production with no impact on the efficiency of the air conditioner.

Keywords:

condensing unit; air conditioner; COP;
electrical generator; air hood

Copyright © 2019 PENERBIT AKADEMIA BARU - All rights reserved

1. Introduction

In recent decades, the demand for energy has increased due to extreme population growth and industrialization [1-3]. Among various forms of energy, electrical energy is the most popular energy and widely used as a basic necessity for life [4-6]. Historically, electricity was produced from the conversion process of fossil fuels such as coal, petroleum and natural gas [7-9]. This process causes the emissions of carbon dioxide, a greenhouse gas that contributes to global warming [10-14]. For these reasons, renewable energy sources are being investigated to move towards a sustainable

* Corresponding author.

E-mail address: atthakornt@nu.ac.th (Atthakorn Thongtha)

energy system such as hydroelectric power, solar energy, geothermal energy and wind energy [15-17].

In tropical areas, the weather is hot all year round with a high level of solar radiation and limited cloud cover [18,19]. These conditions caused a significant accumulation of heat and moisture in buildings [20-24]. Ventilating fans and air conditioners are used to cool the air in buildings. Presently, the use of air conditioners in modern society has become the norm for most buildings [25,26]. As the air conditioner works, the motor with a fixed propeller on the compressor rotates to ventilate the higher temperature of the coils [27]. From the literature reviews, the exhausted air from the compressor fan cannot sufficiently induce the rotation of blades that was installed by the generator [28,29]. Furthermore, the investigation of electricity generation from the exhausted wind of the condensing unit on the energy efficiency ratio has rarely been studied in the previous works. To increase the exhaust wind levels from the compressor and the potential of electricity generation, rectangle-shaped and circular-shaped hoods were installed at the condensing unit to connect to the fan of electrical generator. Importantly, the effects of hood and generator installation on efficiency of air conditioner were also investigated and compared.

2. Experimental Theory

The theory of this study is divided into 2 parts, the performance of the air conditioner, and the ventilation hood.

2.1 Performance of Air Conditioner

The performance of an air conditioner is calculated from the cooling capacity (Q) which is the capability measurement of a cooling system for removing heat. It depends on the enthalpy of the supplied and returned air from the fan coil unit by Eq. (1).

$$Q = 3.968V' (h_r - h_s) / 4.187v \quad (1)$$

Where Q is the cooling capacity (BTU/hr), h_r is the enthalpy of the return air and h_s is the enthalpy of the supply air from the fan coil unit (kJ/kg), V is the volume of air flow through the fan coil unit (m^3/hr), and v is the specific volume of humid air (m^3/kg).

Performance of the air conditioning unit is measured by the coefficient of performance or COP. It is the ratio of the desired output over the required input of the system which is a ratio of the heat that is removed from the cooled space over the input work or consumed electrical energy, by the following Eq. (2).

$$COP = Q / 3.413 \times P_e \quad (2)$$

Energy Efficiency Ratio (EER) is the ratio of output cooling energy (Q ; BTU/hr) to input electrical energy as the following Eq. (3) (P_e ; W), EER units are therefore BTU/W•hr.

$$EER = Q / P_e \quad (3)$$

2.2 Ventilation Hood Theory

In particular fluid dynamics, the volumetric flow rate (also known as volume flow rate, rate of fluid flow or volume velocity) is the volume of fluid which passes per unit of time. The volume flow rate calculation is shown in Eq. (4).

$$V_{air} = u_{hood} \times A_{hood} \quad (4)$$

where V_{air} is the flowing volume through the hood (m^3/s). u_{hood} is the flow velocity through the hood (m/s), and A_{hood} is the cross-sectional area of the hood (m^2).

3. Methodology

3.1 The Operation of the Condensing Unit

An experimental setup was done to investigate the potential of electricity generation from mechanical energy of a condensing unit of air conditioner. The split-typed Mitsubishi air conditioner model GL09VF size 9,212 BTU was considered to operate within a 3.0 m x 3.0 m x 2.6 m room dimension. The working temperature of the air conditioner was set to 25 °C in the cool mode and the fan speed set to level 5. In this study, the working period of the fan motor in condensing unit was studied. This process was tested throughout the day to measure the number and average time of motor rotation every hour in each day.

3.2 The Potential of Electricity Generation from Exhausted Ventilation of the Air Condensing Unit

The investigation of the potential for electricity generation from the condensing unit of an air conditioner is divided into 3 parts: i) the potential of electricity generation from the air ventilation of a normal condensing unit, ii) the potential of electricity generation from the air ventilation of the condensing unit with a rectangle-shaped hood and iii) the potential of electricity generation from the air ventilation of the condensing unit with a circle-shaped hood. In all cases, electricity was produced from a 24 V 300 W DC generator.

3.2.1 The potential of electricity generation from an air ventilation of the normal condensing unit.

Figure 1 shows the experimental setup to measure the wind speed, voltage (V) and current (I) values. The output power (P) and electricity work (W) are as follows in Eq. (5) and Eq. (6), respectively.

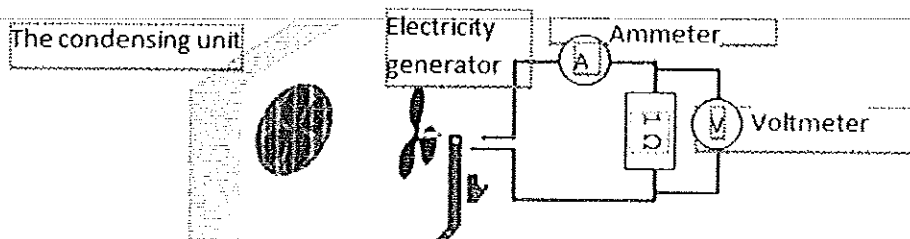


Fig. 1. The electricity generation of the normal condensing unit

$$\text{Electrical power } (W) = I \times V \quad (5)$$

$$\text{Electrical work } (W \cdot \text{hr}) = I \times V \times T \quad (6)$$

3.2.2 The potential of electricity generation from air ventilation of the condensing unit with the hood

In this experiment, the rectangle-shaped hood (as shown in Figure 2) and the circle-shaped hood (as shown in Figure 3) were set up to increase the wind speed by the following Eq. (4). One side of the hood was connected to the air ventilation fan of the condensing unit and another side of the hood was designed with the half cross-sectional area as illustrated in Figure 2 and 3.

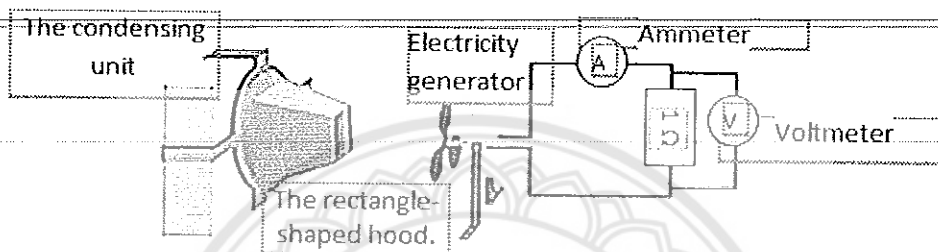


Fig. 2. Electricity generation of the condensing unit with the rectangle-shaped hood

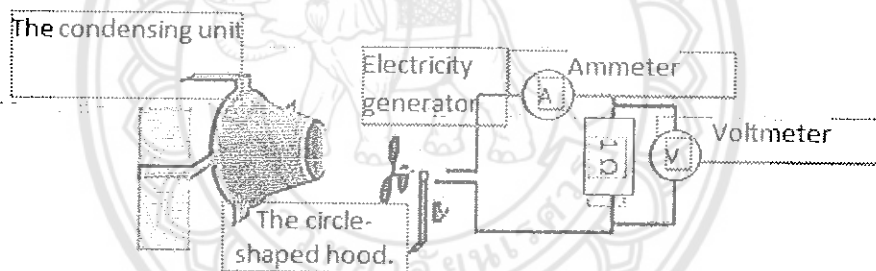


Fig. 3. Electricity generation of the condensing unit with the circle-shaped hood

The voltage (V) and current (I) produced by the electrical generator were measured. And the power (P) and electricity work (W) were calculated by following Eq. (5) and Eq. (6).

3.3 Performance of the Air Conditioner by the Operation of the Fan Coil Unit

K-type thermocouples with an accuracy of ± 0.5 °C were employed to measure the ambient and room temperatures throughout the duration of the experiments. All data were recorded at 10 min intervals using a data logger. Data was recorded continuously throughout the duration of experiments in real ambient conditions. Humidity data recorders were also set both inside and outside the rooms to measure the humidity, as shown in Figure 4.

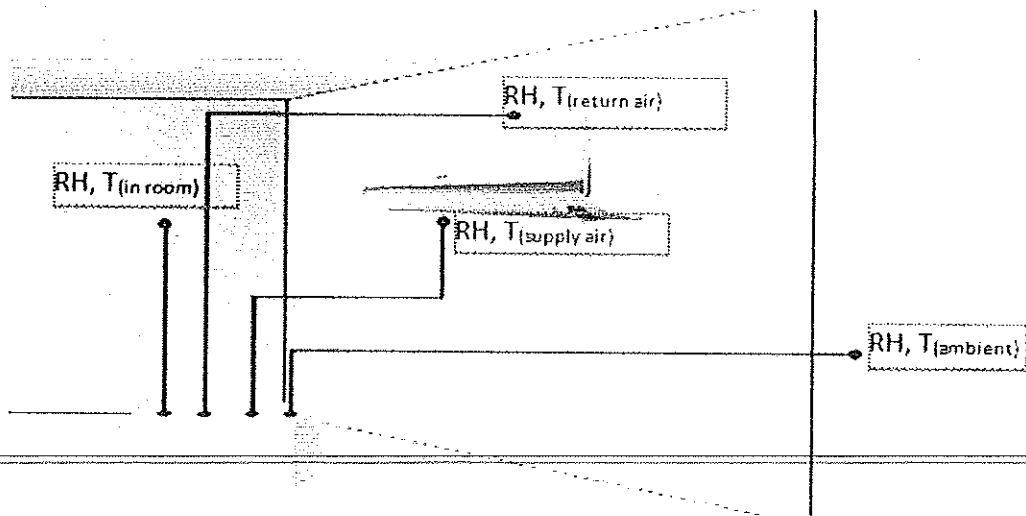


Fig. 4. The positions of temperature and humidity measurements

4. Results and Discussion

The study is divided into 3 parts including of the operation of the normal condensing unit, the electricity generation from the condensing unit and the performance of the air conditioner.

4.1 The Operation of the Normal Condensing Unit.

The time period, counts and average time of the rotation of the motor in a condensing unit of air conditioner was observed every hour from midnight of day to midnight of the following day, giving a 24 h test cycle. The rotation of the motor in a condensing unit of air conditioner was approximately 6 times per hour throughout three days. For the three days tested, the average rotation time of the motor was from 174 s to 299 s, and the total time of work was 30,961 s/day or 8.60 hours per day as shown in Figure 5.

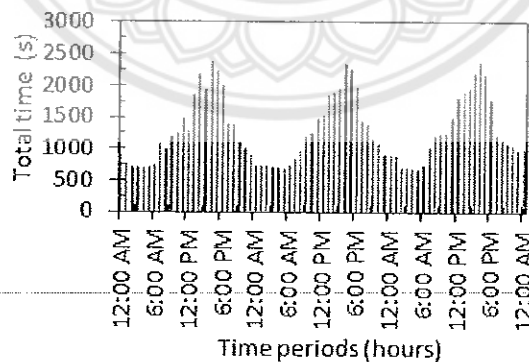


Fig. 5. The working period of the motor rotation in a condensing unit

4.2 The Electricity Generation from the Condensing Unit of Air Conditioner

Figure 6-8 show the potential of electricity generation of the normal condensing unit, that of a condensing unit with a rectangle-shaped and that of a circle-shaped hood. The average exhaust air

speed in the case of the normal condensing unit, the condensing unit with the rectangle-shaped hood, and the condensing unit with the circular-shaped hood was 7.6 m/s 12.4 m/s and 12.5 m/s, respectively.

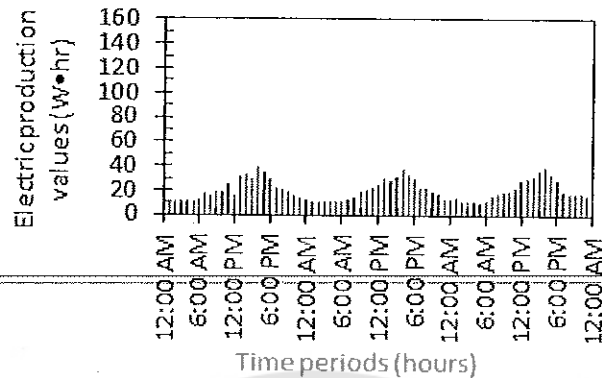


Fig. 6. Electricity production values in the case of a normal condensing unit

This demonstrated that a hood installed on the condensing unit can increase the exhausted air speed from the condensing unit. When the electrical energy generator was installed, the average voltage produced of the normal condensing unit, condensing unit with a rectangle-shaped hood and condensing unit with a circular-shaped hood was 7.9 V, 15.6 V and 16.1 V, respectively. The daily average electrical production values of the normal condensing unit, condensing unit with a rectangle-shaped hood and a condensing unit with a circular-shaped hood were 491.8 W·hr, 1951.9 W·hr and 2071.6 W·hr, as shown in Figure 6-8, respectively. This indicated that the installation of a hood can improve the electricity production.

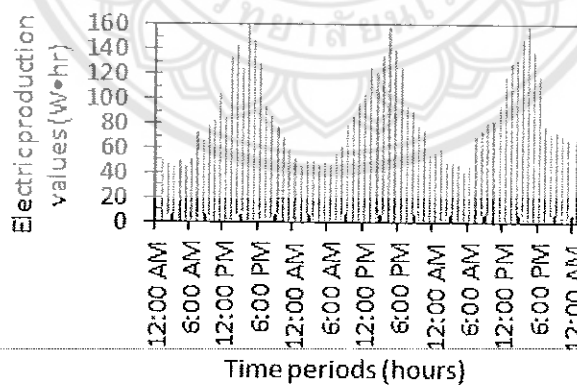


Fig. 7. Electricity production values of the condensing unit with a rectangle-shaped hood

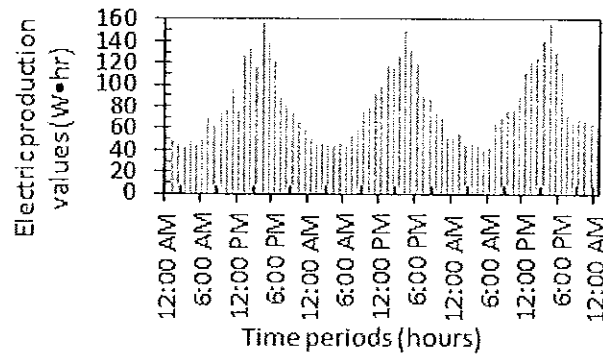


Fig. 8. Electricity production values of the condensing unit with a circular-shaped hood

4.3 The Coefficient of Performance of the Air Conditioner

The performance of the air conditioner based on the Coefficient of Performance (COP) and the Energy Efficiency Ratio (EER), which are calculated from the cooling capacity (Q) and the actual electrical power consumption (P).

4.3.1 Temperatures and relative humidity in case of the normal condensing unit

Temperature and relative humidity in case of the normal condensing unit are displayed in Figure 9. For 3 days, the ambient temperature (T_{am}) varies between 31.0 °C and 40.0 °C while, the relative humidity (RH_{am}) of the surroundings varies between 57.6 % and 96.9 %. This is inversely related to the ambient temperature. The relative humidity (RH_{sup}) of the supply air from the fan coil air unit varies between 88.3 % and 98.9 % and the temperature (T_{sup}) swing of the supply air from the fan coil air unit is between 10.2 °C and 22.4 °C. The stable room temperature was controlled by the air conditioner. The average room temperature (T_{in}) was approximately 25 °C and the relative humidity (RH_{in}) varied between 39.4 % and 91.1 %. At the same time, the average temperature (T_{re}) of the return air to fan coil air unit was approximately 25 °C and the relative humidity (RH_{re}) varied between 36.6 % and 83.8 %.

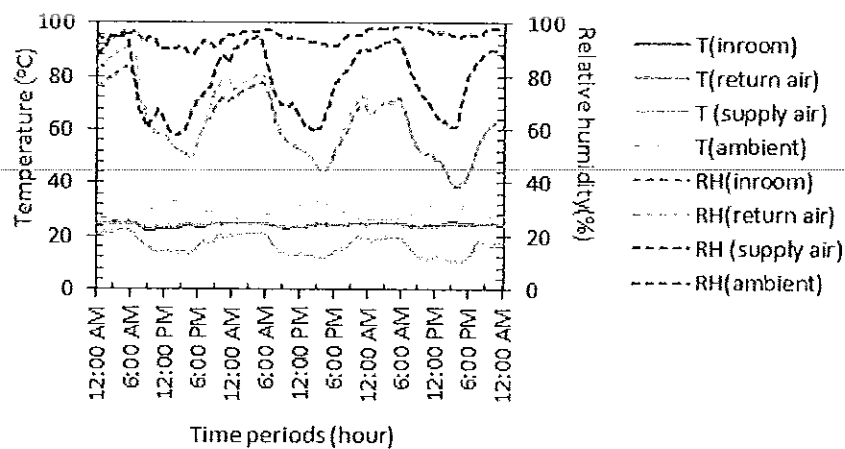


Fig. 9. Temperature and relative humidity in case of the normal condensing unit

Next, the cooling capacity (Q), that is the measurement of a cooling system's ability to remove heat, was studied [30]. The temperature and relative humidity of the supply air from the fan coil unit and the return air to the fan coil unit were used to calculate the cooling capacity. The fluctuation of the cooling capacity is between 5490.3 BTU/hr and 23062.7 BTU/hr, the range of maximum values occurs in the afternoon of each day. The average cooling capacity for 3 days was approximately 14989.7 BTU/ hr. For actual AC electrical power consumption (P_e), the turn is similar to the cooling capacity. The fluctuation of P_e varies between 1021.0 W and 1110.8 W. The average P_e for 3 days was 1067.7 W, as illustrated in Figure 10.

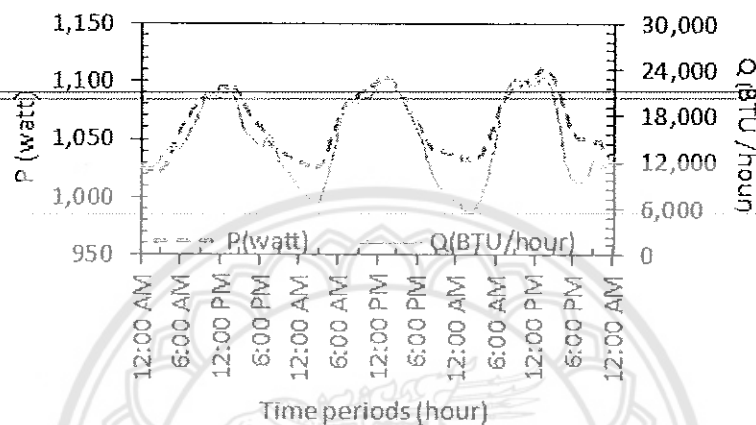


Fig. 10. The cooling capacity (Q) and AC power consumption (P) in case of the normal condensing unit

4.3.2 The temperature and relative humidity in case of the condensing unit and the generator

The average ambient temperature (T_{am}) varies between 26.3 °C and 33.4 °C throughout 3 days. The relative humidity (RH_{am}) of the environment varies between 43.4 % and 97.3 %. This correlation is inverse with the ambient temperature. The relative humidity (RH_{sup}) of supply air from fan coil air unit varies between 87.1 % and 97.8 % and the temperature (T_{sup}) swing of supply air from fan coil air unit is between 10.1 °C and 21.5 °C. The average room temperature (T_{in}) was fixed at approximately 25 °C. The relative humidity (RH_{in}) within the testing room varies between 38.5 % and 95.2 %. At the same time, the average temperature (T_{re}) of the return air to fan coil air unit is approximately 24 °C and the relative humidity (RH_{re}) of the return air to fan coil air unit varies between 37.6 % and 87.4 %, as illustrated in Figure 11.

The fluctuation of the cooling capacity (Q) varies between 53780.7 BTU/hr and 22895.8 BTU/hr, the range of maximum values occurs in the afternoon of each day. The average cooling capacity for 3 days was approximately 15132.4 BTU/ hr. For the actual AC electrical power consumption (P_e), the fluctuation varies between 1008.5 and 1123.6 W. The average P_e for 3 days was approximately 1059.3 W. that is corresponded to the cooling capacity, as shown in Figure 12.

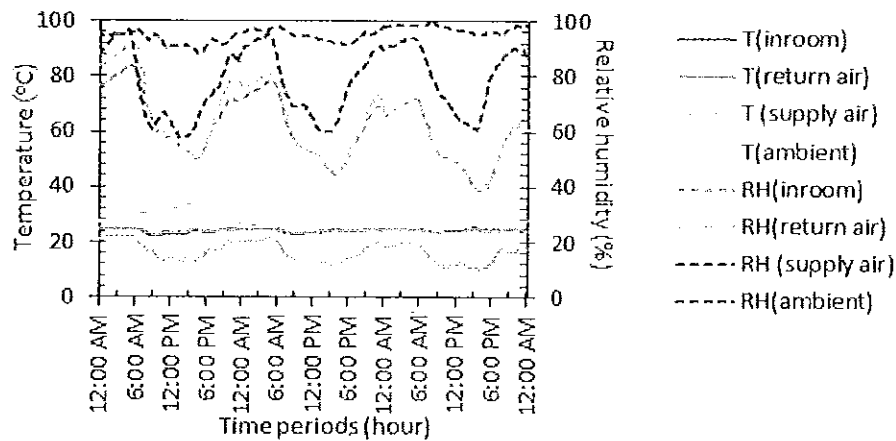


Fig. 11. Temperature and relative humidity in case of the condensing unit with installing generator

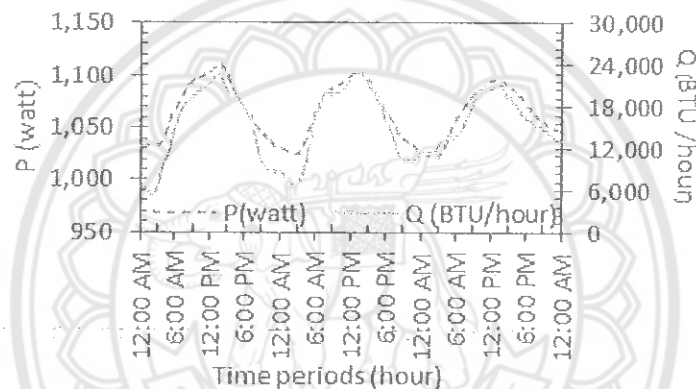


Fig. 12. The cooling capacity (Q) and AC power consumption (P) in the case of the condensing unit with a circular-shaped hood

4.3.3 The temperature and relative humidity in case of the condensing unit with a circular-shaped hood

The ambient temperature (T_{am}) for 3 days varies between 26.4 °C and 33.3 °C while the relative humidity (RH_{am}) in the ambient space varies between 56.4 % and 96.2 %, This relative humidity (RH_{am}) is inverse with the ambient temperature. The relative humidity (RH_{sup}) of the supply air from fan coil air unit, varies between 88.3 % and 98.9 % and the temperature (T_{sup}) swing is between 10.4 °C and 22.4 °C. The average room temperature (T_{in}) is controlled at approximately 24 °C and the relative humidity (RH_{in}) in the room varies between 38.6 % and 84.2 %. At the same time, the average temperature (T_{re}) of the return air to fan coil air unit was approximately 24 °C and the relative humidity (RH_{re}) varies between 39.0 % and 92.3 %, as illustrated in Figure 13.

In this case, the fluctuation of the cooling capacity (Q) is between 6387.9 BTU/hr and 23589.9 BTU/hr, the range of maximum values occurs in the afternoon of each day. The average cooling capacity for 3 days was approximately 15211.8 BTU/hr. For the actual AC electrical power consumption (P_e), the curve is similar to the cooling capacity. The fluctuation varies between 1009.9 W and 1112.2 W. The average P_e for 3 days was approximately 1112.5 W, as shown in Figure 14.

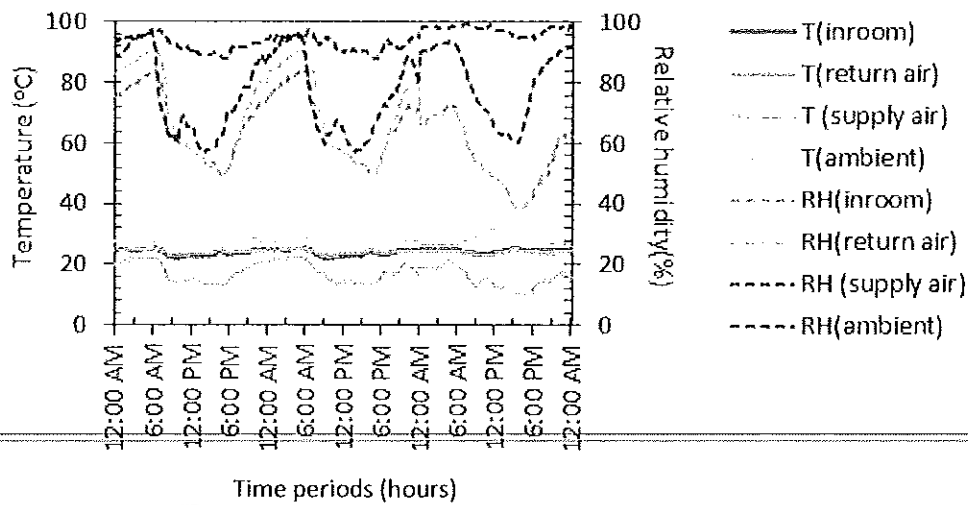


Fig. 13. Temperature and relative humidity in the case of the condensing unit with a rectangle-shaped hood

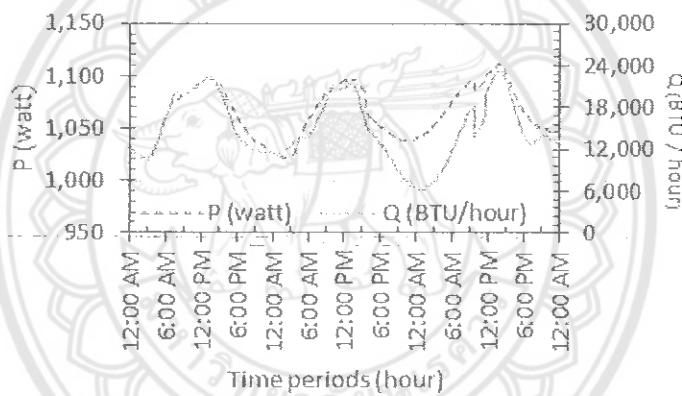


Fig. 14. The cooling capacity (Q) and AC power consumption (P) in the case of the condensing unit with a rectangle-shaped hood

4.3.4 The temperature and relative humidity of the condensing unit with circle-shaped hood

The ambient temperature (T_{am}) for 3 days varied between 25.1 °C and 33.0 °C while the relative humidity (RH_{am}) in the surrounding varied between 56.8 % and 97.1 %. The relative humidity is inverse with the ambient temperature. The relative humidity (RH_{sup}) of the supply air from the fan coil air unit varies between 90.1 % and 98.0 % and the temperature (T_{sup}) swing is between 10.3 °C and 22.9 °C. The average room temperature (T_{in}) was approximately 24 °C, the relative humidity (RH_{in}) varies between 38.5 % and 91.1 %. At the same time, the average temperature (T_{re}) of the return air to fan coil air unit was at approximately 24 °C and the relative humidity (RH_{re}) varies between 36.6 % and 84.2 %, as shown in Figure 15.

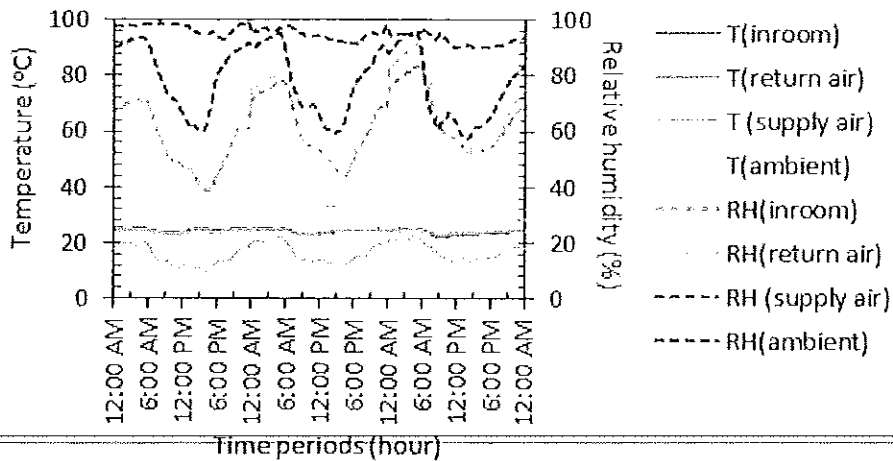


Fig. 15. The temperature and relative humidity in the case of the condensing unit with a circular-shaped hood

In this case, the fluctuation of the cooling capacity (Q) is between 5139.3 BTU/hr and 21698.3 BTU/hr, the range of maximum values occurs in the afternoon of each day. The average cooling capacity for 3 days was approximately 14998.2 BTU/hr. For the actual AC electrical power consumption (P_e), the curve is similar the cooling capacity. The fluctuation varies between 1016.2 W to 1245.5 W. The average P_e for 3 days was approximately 1100.8 W, as shown in Figure 16.

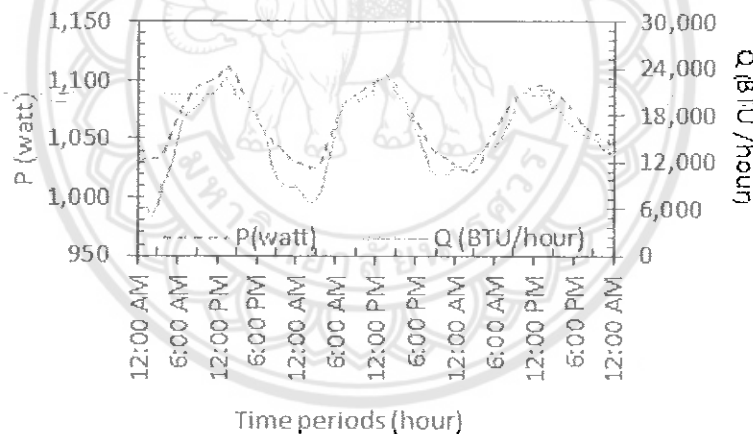


Fig. 16. The cooling capacity (Q) and AC power consumption (P) in the case of the condensing unit with the installation of circle-shaped hood

4.3.5 The performance of the air conditioner

From the previous data, the average values of the Coefficient of Performance (COP) in the case of the normal condensing unit (case 1), that of installing only an electrical generator (case 2), that of installing a rectangle-shaped hood and an electrical generator (case 3), and that of installing a circular-shaped hood and a generator (case 4) are approximately 4.1, 4.1, 4.1 and 4.1 and the average Energy Efficiency Ratio (EER) of all cases was around 14.0 BTU/W·hr. This demonstrated that the condensing unit that was operated with the rectangle-shaped/circle-shaped hood and generator for electricity production has no effect on the coefficient of performance of the air conditioner, as displayed in Figure 17.

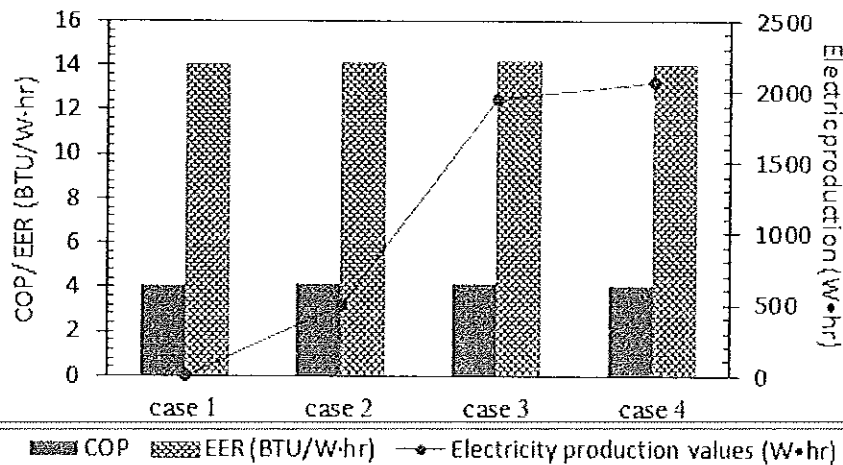


Fig. 17. The performance of the air conditioner and the electricity production values

5. Conclusions

The installation of an air hood, to funnel exhaust air, and a generator for electrical generation on a condensing unit has no impact on the coefficient of performance of the air conditioner. The addition of a rectangle-shaped or a circular-shaped hood on a condensing unit can increase the exhausted air speed. The average air speed values of the air ventilation at the end of the normal condensing unit, rectangle-shaped and circular-shaped hood was approximately 7.6 m/s, 12.4 m/s and 12.5 m/s, respectively. Higher average electricity production was produced from the installation of the rectangle-shaped and circular-shaped hoods at the exhausted air position of condensing unit. The coefficient of performance of the air conditioner in all conditions was approximately 4.1. Therefore, the use of the air ventilation of air conditioning condensing units for generating electricity is an alternative way to produce renewable energy to produce electricity for low power electronic equipment.

Acknowledgement

The authors would like to thank the Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University for providing facilities and financial support to this research work, and our research center. Thanks to Dr. Kyle V. Lopin for editing of this document.

References

- [1] Royston, Sarah, Jan Selby, and Elizabeth Shove. "Invisible energy policies: A new agenda for energy demand reduction." *Energy Policy* 123 (2018): 127-135.
- [2] Tian, Xin, Fuli Bai, Jinhua Jia, Yang Liu, and Feng Shi. "Realizing low-carbon development in a developing and industrializing region: Impacts of industrial structure change on CO2 emissions in southwest China." *Journal of environmental management* 233 (2019): 728-738.
- [3] Mohsina, R., Z. A. Majid, A. H. Shihnan, N. S. Nasrid, Z. Sharere, and R. C. Matf. "Effects of Multi-Variant Biofuel on Engine Performance and Exhaust Emission of DDF Engine System." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 6, no. 1 (2015): 1-18.
- [4] De Courchelle, Inès, Tom Guérout, Georges Da Costa, Thierry Monteil, and Yann Labit. "Green energy efficient scheduling management." *Simulation Modelling Practice and Theory* 93 (2019): 208-232.
- [5] Liu, Jia, Xi Chen, Sunliang Cao, and Hongxing Yang. "Overview on hybrid solar photovoltaic-electrical energy storage technologies for power supply to buildings." *Energy Conversion and Management* 187 (2019): 103-121.

- [6] Khattak, M.A., T.M.H.T. Yahya, M.W.M. Sallehuddin, M.I.M. Ghazali, N.A. Abdullah, and et al. "Global Energy Security and Eastern Europe: A Review." *Journal of Advanced Research Design* 45, no. 1 (2018): 19-42.
- [7] Kåberger, Tomas. "Progress of renewable electricity replacing fossil fuels." *Global Energy Interconnection* 1, no. 1 (2018): 48-52.
- [8] Lazkano, Itziar, Linda Nøstbakken, and Martino Pelli. "From fossil fuels to renewables: The role of electricity storage." *European Economic Review* 99 (2017): 113-129.
- [9] Mohammad, R., F. Sharif, D. Sharif, Norazli Othman, and Z.A. Kadir. "Design of Heat Exchanger Network in Olefin Unit of Oil Refinery." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 12, no. 1 (2015): 21-34.
- [10] Li, Shijie, Chunshan Zhou, and Shaojian Wang. "Does modernization affect carbon dioxide emissions? A panel data analysis." *Science of the Total Environment* 663 (2019): 426-435.
- [11] Li, Jiazhen, Wenxu Dong, Oene Oenema, Tuo Chen, Chunsheng Hu, Haijing Yuan, and Liying Zhao. "Irrigation reduces the negative effect of global warming on winter wheat yield and greenhouse gas intensity." *Science of the Total Environment* 646 (2019): 290-299.
- [12] Budiyanto, Muhammad Arif, Takeshi Shinoda, Firman-Ady Nugroho, and Buddi Wibowo. "Estimated of energy saving from the application of roof shade on the refrigerated container storage yard." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 46, no. 1 (2018): 114-121.
- [13] Mohammadi, Amin, and Mehdi Mehrpooya. "A comprehensive review on coupling different types of electrolyzer to renewable energy sources." *Energy* 158 (2018): 632-655.
- [14] Saba, L.A., M.H. Ahmad, R.A. Majid and A. Yahaya. "Material and Assembly Selection: Comparative Analysis of Embodied Energy and Carbon as an Index for Environmental Performance." *Journal of Advanced Research in Materials Science* 44, no. 1 (2018): 1-24.
- [15] Zerrahn, Alexander, Wolf-Peter Schill, and Claudia Kemfert. "On the economics of electrical storage for variable renewable energy sources." *European Economic Review* 108 (2018): 259-279.
- [16] Ghaderian, J., C. N. Azwadi, and H. Mohammed. "Modelling of energy and exergy analysis for a double-pass solar air heater system." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 16, no. 1 (2015): 15-32.
- [17] Doorga, Jay Rovisham Singh, Soonil DDV Rughooputh, and Ravindra Boojhawon. "High resolution spatio-temporal modelling of solar photovoltaic potential for tropical islands: Case of Mauritius." *Energy* 169 (2019): 972-987.
- [18] Anis, Md Shahrukh, Basharat Jamil, Md Azeem Ansari, and Evángelos Bellos. "Generalized models for estimation of global solar radiation based on sunshine duration and detailed comparison with the existing: A case study for India." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 31 (2019): 179-198.
- [19] Hashim, G.A. and N.A.C. Sidik. "Numerical Study of Harvesting Solar Energy from Small-Scale Asphalt Solar Collector." *Journal of Advanced Research Design* 2, no.1 (2014): 10-19.
- [20] Cornejo-Bueno, L., C. Casanova-Mateo, J. Sanz-Justo, and S. Salcedo-Sanz. "Machine learning regressors for solar radiation estimation from satellite data." *Solar Energy* 183 (2019): 768-775.
- [21] Ballestrín, J., M. Casanova, R. Monterreal, J. Fernández-Reche, E. Setien, J. Rodríguez, J. Galindo, F. J. Barbero, and F. J. Batlles. "Simplifying the measurement of high solar irradiance on receivers. Application to solar tower plants." *Renewable Energy* 138 (2019): 551-561.
- [22] Badescu, Viorel. "How much work can be extracted from diluted solar radiation?" *Solar Energy* 170 (2018): 1095-1100.
- [23] Lim, Dae Kyu, Byoung Ha Ahn, and Ji Hwan Jeong. "Method to control an air conditioner by directly measuring the relative humidity of indoor air to improve the comfort and energy efficiency." *Applied energy* 215 (2018): 290-299.
- [24] Fekadu, Geleta, and Sudhakar Subudhi. "Renewable energy for liquid desiccants air conditioning system: a review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 93 (2018): 364-379.
- [25] Sidik, N.A.C. and O.A. Alawi. "Computational Investigations on Heat Transfer Enhancement Using Nanorefrigerants." *Journal of Advanced Research Design* 1, no. 1 (2014): 35-41.
- [26] Morsy, M., M. Fahmy, H.A. Elshakour and A.M. Belal. "Effect of Thermal Insulation on Building Thermal Comfort and Energy Consumption in Egypt." *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics* 43, no. 1 (2018): 8-19.
- [27] Sidik, N.A.C., T.H. Kean, H.K. Chow, A. Rajaandra, S. Rahman and J. Kaur. "Performance Enhancement of Cold Thermal Energy Storage System Using Nanofluid Phase Change Materials: A Review." *Journal of Advanced Research in Materials Science* 43, no. 1 (2018): 1-21.
- [28] Takleh, H. Rostamnejad, and V. Zare. "Employing thermoelectric generator and booster compressor for performance improvement of a geothermal driven combined power and ejector-refrigeration cycle." *Energy Conversion and Management* 186 (2019): 120-130.

- [29] Shan, M. A., C. H. U. Wuli, Haoguang Zhang, L. I. Xiangjun, and Haiyang Kuang. "A combined application of micro-vortex generator and boundary layer suction in a high-load compressor cascade." *Chinese Journal of Aeronautics* 32, no. 5 (2019): 1171-1183.
- [30] Shin, Mi Su, Kyu Nam Rhee, Sang Hoon Park, Myoung Souk Yeo, and Kwang Woo Kim. "Enhancement of cooling capacity through open-type installation of cooling radiant ceiling panel systems." *Building and Environment* 148 (2019): 417-432.

