



วิทยานิพนธ์

นวัตกรรมการผลิตวัสดุเปลี่ยนสถานะเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในสิ่งก่อสร้าง
เพื่ออนุรักษ์พลังงาน

**INNOVATIVE PRODUCTION OF PHASE CHANGE
MATERIALS AS COMPOSITION USED IN BUILDING
MATERIALS FOR ENERGY CONSERVATION**

นายกำพล ล้อเลิศสกุล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)
ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

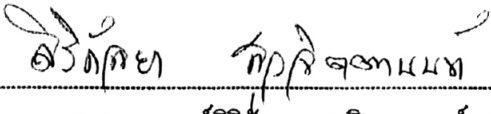
เรื่อง นวัตกรรมการผลิตวัสดุเปลี่ยนสถานะเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในสิ่งก่อสร้างเพื่ออนุรักษ์พลังงาน

Innovative Production of Phase Change Materials as Composition Used in Building
Materials for Energy Conservation

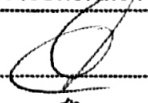
นามผู้วิจัย นายกำพล ถิ่นเลิศสกุล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

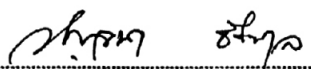
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


(รองศาสตราจารย์สุวิทย์ สุวจิตตานนท์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา


(รองศาสตราจารย์ไพศาล คงกาญจนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์ชูัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 29 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2551

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

นวัตกรรมการผลิตวัสดุเปลี่ยนสถานะเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในสิ่งก่อสร้าง
เพื่ออนุรักษ์พลังงาน

Innovative Production of Phase Change Materials as Composition Used in Building Materials
for Energy Conservation

โดย

นายกำพล ล้อเลิศสกุล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2551

กำหนด ลือเลิศสกุล 2551: นวัตกรรมการผลิตวัสดุเปลี่ยนสถานะเพื่อใช้เป็นส่วนผสมใน
สิ่งก่อสร้างเพื่ออนุรักษ์พลังงาน ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)
สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
รองศาสตราจารย์ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์, Ph.D. 131 หน้า

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการนำวัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Materials, PCMs)
มาทดลองใช้งานร่วมกับวัสดุก่อสร้าง โดยวัสดุเปลี่ยนสถานะที่ใช้คือพาราฟิน ได้แบ่งการ
ทดลองออกเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกเป็นการผลิตวัสดุเปลี่ยนสถานะ โดยการนำถ้ำลอยมาดูด
ซับพาราฟินด้วยวิธีการแช่แบบธรรมดา และวิธีการแช่แบบระบบสุญญากาศ จากนั้นจึงนำไป
ทำการทดสอบหาคุณสมบัติทางความร้อน ในการทดลองพบว่าการดูดซับพาราฟินของถ้ำลอย
ด้วยวิธีการแช่แบบระบบสุญญากาศ สามารถดูดซับพาราฟินได้ดีกว่าวิธีการแช่แบบธรรมดา
นอกจากนี้สถานะที่ใช้ในการแช่แบบระบบสุญญากาศ ยังมีผลต่อการดูดซับพาราฟินของถ้ำลอย
เช่นกัน การทดลองในส่วนที่สองเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุเปลี่ยนสถานะที่ผลิตได้
โดยการนำไปใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ ในการทดลองได้สร้างห้องจำลองขนาด 150 x 150 x 150
มิลลิเมตร โดยหลังคาด้านบนของห้องจำลองเป็นมอร์ตาร์เพทและมอร์ตาร์ PCMs เพท ส่วน
ด้านบนของหลังคามีหลอดไฟขนาด 100 วัตต์ให้ความร้อน พบว่าห้องจำลองที่หลังคาเป็นมอร์ตาร์
PCMs เพท สามารถดูดเก็บพลังงานความร้อนเพื่อป้องกันความร้อนเข้าสู่ภายในห้องได้
ดีกว่ามอร์ตาร์เพท นอกจากนี้ความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ที่ใช้งานร่วมกับวัสดุเปลี่ยนสถานะ
ยังได้รับการทดสอบอีกด้วย โดยความแข็งแรงของวัสดุจะลดลงเมื่อปริมาณของวัสดุเปลี่ยน
สถานะเพิ่มขึ้น

Kamphol Lorlertsakul 2008: Innovative Production of Phase Change Materials as Composition Used in Building Materials for Energy Conservation. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Sirikalaya Suwatjittanon, Ph.D. 131 pages.

This research aimed to study an application of Phase Change Materials (PCMs) blended with constructional materials. Paraffin was used as the PCMs. Experiments were performed in two following parts. First, the PCMs was synthesised by an absorption of paraffin with fly ash via normal immersion and vacuum immersion. Thermal property of the synthesised PCMs was tested. Results showed that paraffin absorbability of fly ash via vacuum immersion was considerably higher than normal immersion and the absorbability was also effected by the vacuum immersion conditions. Second, effectiveness of the synthesised PCMs blended with cement was investigated. A 150x150x150 millimeter model room was built. Mortar plate and mortar-PCMs-plate were used as a roof, each at a time. The room inside was heated by a 100 watts electric light bulb equipped on a housetop. Results showed higher heat absorption of the mortar-PCMs-plate roof so it could prevent heat flow into the room more than mortarplate one. Moreover, strength of the PCMs blended with the cement was tested and it was found that the strength decreased with increasing amount of the PCMs.

Kamphol Lorlertsakul
Student's signature

Sirikalaya Suwatjittanon
Thesis Advisor's signature

21 / 05 / 07

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือและความกรุณาจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ให้ความดูแลเอาใจใส่และให้คำปรึกษาแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์อย่างดียิ่ง

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากหน่วยงานดังต่อไปนี้ สถาบันพัฒนาและวิจัยแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และโครงการพัฒนาบัณฑิตและวิจัยด้านวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ADB)

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ธุรการของภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ช่วยติดต่อประสานงานและอำนวยความสะดวกในการทำโครงการจนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณครอบครัว เพื่อนๆ พี่ๆ น้อง ๆ วิศวกรรมเคมี และบุคคลรอบข้างทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และความรู้สึที่ดีตลอดมา รวมถึงคำแนะนำและสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้

ประโยชน์อันใดอันจะเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่เมตตาอบรมสั่งสอน ให้คำแนะนำต่างๆ จนถึงปัจจุบัน

กำพล ล้อเลิศสกุล

เมษายน 2551

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	30
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	46
สรุปและข้อเสนอแนะ	84
สรุป	84
ข้อเสนอแนะ	86
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	87
ภาคผนวก	90
ภาคผนวก ก ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่าง	91
ภาคผนวก ข ข้อมูลสมบัติทางกลศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบแรงกดของผลิตภัณฑ์	109
ภาคผนวก ค การคำนวณค่าความจุความร้อน จุดหลอมเหลวและค่าความร้อนแฝง	125
ภาคผนวก ง การทดสอบหาค่าลึงค์ของมอร์ตาร์ซีเมนต์	127
ภาคผนวก จ องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย	130
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	131

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1	เปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการเก็บสะสมพลังงานความร้อน
2	ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุ PCMs
3	ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุ PCMs
4	เปรียบเทียบข้อดี – ข้อเสียระหว่างสารอินทรีย์กับสารอนินทรีย์
5	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยจาก 5 แหล่งที่ผลิตได้ในประเทศไทย
6	สถานะที่ใช้ทดลองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมต่อการผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs
7	อัตราส่วนผสมระหว่าง PCMs : ปูนซีเมนต์ : ทราย : น้ำ
8	อัตราส่วนระหว่าง PCMs : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ทราย : น้ำ
9	พื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุนและปริมาตรรูพรุนของเถ้าลอย
10	คุณสมบัติทางความร้อนของพาราฟิน
11	ความดันสูญญากาศและสถานะต่างๆที่ใช้ในการทดลองและคุณสมบัติทางความร้อนของ สารตัวอย่าง
12	เปอร์เซ็นต์ความร้อนแฝงของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ที่ความดันสูญญากาศต่างๆ เทียบกับพาราฟิน
13	เวลาในการแช่เถ้าลอยในพาราฟินและสถานะต่างๆที่ใช้ในการทดลองและคุณสมบัติทางความร้อนของสารตัวอย่าง
14	เปอร์เซ็นต์ความร้อนแฝงของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ที่เวลาการแช่พาราฟินต่างๆ เทียบกับพาราฟิน
15	อุณหภูมิของพาราฟินและสถานะต่างๆที่ใช้ในการทดลองและคุณสมบัติทางความร้อนของสารตัวอย่าง
16	เปอร์เซ็นต์ความร้อนแฝงของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ที่อุณหภูมิพาราฟินต่างๆ เทียบกับพาราฟิน
17	กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่อัตราส่วนต่างๆ
18	กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย BLCP ที่อัตราส่วนต่างๆ
19	กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสม PCMs ที่อัตราส่วนต่างๆ

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก1 ข้อมูลพื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุนและปริมาตรรูพรุนของเถ้าลอย	91
ก2 ความดันสุญญากาศและสภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดลองและคุณสมบัติทางความร้อนของ สารตัวอย่าง	93
ก3 เวลาในการแช่เถ้าลอยในพาราฟินและสภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดลองและคุณสมบัติทางความร้อนของสารตัวอย่าง	93
ก4 อุณหภูมิของพาราฟินและสภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดลองและคุณสมบัติทางความร้อนของสารตัวอย่าง	94
ก5 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่อัตราส่วนต่างๆ	103
ก6 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย BLCP ที่อัตราส่วนต่างๆ	103
ก7 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสม PCMs ที่อัตราส่วนต่างๆ	104
ข1 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์	109
ข2 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่อัตราส่วน 10 : 90	110
ข3 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่อัตราส่วน 20 : 80	111
ข4 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่อัตราส่วน 30 : 70	112
ข5 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่อัตราส่วน 40 : 60	113
ข6 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่อัตราส่วน 50 : 50	114
ข7 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย BLCP ที่อัตราส่วน 10 : 90	115
ข8 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย BLCP ที่อัตราส่วน 20 : 80	116

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข9 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย BLCP ที่อัตราส่วน 30 : 70	117
ข10 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย BLCP ที่อัตราส่วน 40 : 60	118
ข11 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย BLCP ที่อัตราส่วน 50 : 50	119
ข12 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสม PCMs ที่อัตราส่วน 10 : 90	120
ข13 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสม PCMs ที่อัตราส่วน 20 : 80	121
ข14 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสม PCMs ที่อัตราส่วน 30 : 70	122
ข15 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสม PCMs ที่อัตราส่วน 40 : 60	123
ข16 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสม PCMs ที่อัตราส่วน 50 : 50	124
ง1 ขนาดคละของทรายมาตรฐาน	127
ง2 ค่าคลาดเคลื่อนที่อนุญาตของการบ่มน้ำที่อัตราส่วน 20 : 80	129
จ1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย	130

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	อิมัลชันที่มีวัฏภาคภายในเป็นพาราฟินและวัฏภาคภายนอกสารละลายเจลาติน	11
2	ภาพถ่ายจาก SEM ของ Microencapsulated ที่เตรียมด้วยวิธี Complex Coacervation	12
3	ภาพถ่ายจาก SEM ของ Microencapsulated ที่เตรียมด้วยวิธี Spray Drying	12
4	บ้านของ David Allan ที่ใช้ PCM มาเป็นสารที่ให้ความอบอุ่นภายในบ้านในเวลา กลางคืน	13
5	รูปร่างลักษณะของถ้ำลอยที่ถ่ายโดย SEM	18
6	ชุดเครื่องมือ DSC	19
7	ชุดอุปกรณ์สำคัญของเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)	20
8	ตำแหน่งการจัดวางอุปกรณ์ของ DSC Apparatus	21
9	คุณสมบัติต่างๆที่ทดสอบได้จากเครื่อง DSC	22
10	ตัวอย่างกราฟในช่วงเริ่มแรกของการทดสอบสารตัวอย่างด้วยเครื่อง DSC	23
11	กราฟที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC สำหรับกระบวนการดูดความร้อน	24
12	กราฟที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC สำหรับกระบวนการคายความร้อน	24
13	การเปรียบเทียบสมรรถภาพของระบบให้ความร้อนใต้พื้นห้องโดยใช้และไม่ใช้ PCMs	28
14	เครื่อง Nitrogen Adsorption รุ่น Autosorb1	31
15	ชุดอุปกรณ์ในการทดลอง	33
16	ถ้ำลอยก่อนและหลังขึ้นรูป	34
17	ชุดทดสอบ DSC-TGA ยี่ห้อ TA INSTRUMENT รุ่น SDT 2860	36
18	เครื่อง SEM ยี่ห้อ PHILIPS รุ่น XL30	37
19	มอร์ตาร์เพลทหนา 20 และ 10 มิลลิเมตร	40
20	มอร์ตาร์ PCMs เพลทหนา 20 มิลลิเมตร	40
21	ภาพการจัดอุปกรณ์เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs	41
22	เครื่องทดสอบแรงอัด	43
23	แม่แบบลูกบาศก์ (Mold) ขนาด 50 mm. x 50 mm.	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
24 เครื่องผสม	44
25 เกรียงและแท่งกระทุ้ง	44
26 การกระจายขนาดรูพรุนของเถ้าลอยจากแม่เมาะ	47
27 การกระจายขนาดรูพรุนของเถ้าลอยจาก BLCF	48
28 เถ้าลอยเมื่อก่อนและหลังการแช่พาราฟินกับเถ้าลอยหลังแช่พาราฟินที่ผ่านการบด	50
29 กราฟ DSC ของพาราฟิน	52
30 ผลของความดันสุญญากาศต่อค่าความร้อนแฝง	54
31 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 0 นิ้วปรอท	54
32 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 10 นิ้วปรอท	55
33 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 20 นิ้วปรอท	55
34 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 30 นิ้วปรอท	56
35 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 40 นิ้วปรอท	56
36 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 50 นิ้วปรอท	57
37 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศต่างๆ	57
38 ผลของเวลาการแช่พาราฟินต่อค่าความร้อนแฝง	59
39 กราฟ DSC ที่เวลาการแช่พาราฟิน 5 นาที	60
40 กราฟ DSC ที่เวลาการแช่พาราฟิน 15 นาที	60
41 กราฟ DSC ที่เวลาการแช่พาราฟิน 30 นาที	61
42 กราฟ DSC ที่เวลาการแช่พาราฟิน 60 นาที	61
43 กราฟ DSC ที่เวลาการแช่พาราฟินต่างๆ	62
44 ผลของอุณหภูมิพาราฟินต่อค่าความร้อนแฝง	64
45 กราฟ DSC ที่อุณหภูมิพาราฟิน 65 องศาเซลเซียส	64
46 กราฟ DSC ที่อุณหภูมิพาราฟิน 90 องศาเซลเซียส	65
47 กราฟ DSC ที่อุณหภูมิพาราฟิน 130 องศาเซลเซียส	65
48 กราฟ DSC ที่อุณหภูมิพาราฟินต่างๆ	66
49 ภาพถ่าย SEM เถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ	68
50 ภาพถ่าย SEM เถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้า BLCF	69

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
51	ภาพถ่าย SEM Paraffin / Fly Ash Composite PCMs	70
52	กราฟแสดงอุณหภูมิภายในห้องจำลองที่เวลาต่างๆ	71
53	กราฟแสดงอุณหภูมิผิวที่เวลาต่างๆ	72
54	การแก้ปัญหาการปลดปล่อยพลังงานความร้อนของ PCMs	74
55	การรั่วซึมของมอร์ตาร์ PCMs เฟลท	74
56	การรั่วซึมของมอร์ตาร์ PCMs เฟลทที่เปอร์เซ็นต์ PCMs ต่างๆ	75
57	มอร์ตาร์ PCMs เฟลททาสี	75
58	สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร	76
59	กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่อัตราส่วนต่างๆ	77
60	กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย BLCP ที่อัตราส่วนต่างๆ	78
61	กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสม PCMs ที่อัตราส่วนต่างๆ	79
62	กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน 10:90	80
63	กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน 20:80	80
64	กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน 30:70	81
65	กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน 40:60	81
66	กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน 50:50	82
ภาพผนวกที่		
ก1	การกระจายขนาดรูพรุนของเถ้าลอยจากแม่เมาะ	91
ก2	การกระจายขนาดรูพรุนของเถ้าลอยจาก BLCP	92
ก3	กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 0 นิ้วปรอท	94
ก4	กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 10 นิ้วปรอท	95
ก5	กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 20 นิ้วปรอท	95
ก6	กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 30 นิ้วปรอท	96
ก7	กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 40 นิ้วปรอท	96
ก8	กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 50 นิ้วปรอท	97

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก9 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศต่างๆ	97
ก10 กราฟ DSC ที่เวลาการแช่พาราฟิน 5 นาที	98
ก11 กราฟ DSC ที่เวลาการแช่พาราฟิน 15 นาที	98
ก12 กราฟ DSC ที่เวลาการแช่พาราฟิน 30 นาที	99
ก13 กราฟ DSC ที่เวลาการแช่พาราฟิน 60 นาที	99
ก14 กราฟ DSC ที่เวลาการแช่พาราฟินต่างๆ	100
ก15 กราฟ DSC ที่อุณหภูมิพาราฟิน 65 องศาเซลเซียส	100
ก16 กราฟ DSC ที่อุณหภูมิพาราฟิน 90 องศาเซลเซียส	101
ก17 กราฟ DSC ที่อุณหภูมิพาราฟิน 130 องศาเซลเซียส	101
ก18 กราฟ DSC ที่อุณหภูมิพาราฟินต่างๆ	102
ก19 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่อัตราส่วนต่างๆ	104
ก20 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย BLCP ที่อัตราส่วนต่างๆ	105
ก21 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสม PCMs ที่อัตราส่วนต่างๆ	105
ก22 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน 10:90	106
ก23 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน 20:80	106
ก24 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน 30:70	107
ก25 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน 40:60	107
ก26 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน 50:50	108
ค1 กราฟ DSC ของพาราฟินที่ได้จากโปรแกรม TA ANALYSIS	125
ง1 แท่นทดสอบการไหลแผ่	128
ง2 แบบและแท่งกระทุ้ง	128

นวัตกรรมการผลิตวัสดุเปลี่ยนสถานะเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในสิ่งก่อสร้าง เพื่ออนุรักษ์พลังงาน

Innovative Production of Phase Change Materials as Composition Used in Building Materials for Energy Conservation

คำนำ

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นพื้นฐานทั้งทางตรงและทางอ้อมของมนุษย์ กิจกรรมทุกระดับของมนุษย์ ต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น และยิ่งมนุษย์ต้องการความสะดวกสบายยิ่งต้องใช้พลังงานมากขึ้น แหล่งกำเนิดพลังงานในปัจจุบัน คือ เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ พลังงานจากเชื้อเพลิงต่างๆ เหล่านี้นอกจากจะมีจำกัดแล้ว ก็ยังสร้างปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงทำลายชั้นบรรยากาศของโลกด้วย ปัจจุบันประเทศต่างๆ ในโลกได้ให้ความสนใจในการแก้ปัญหาเหล่านี้ โดยวิธีหนึ่งที่ได้รับคามสนใจเป็นอย่างมาก คือ การจัดการพลังงาน (Energy Management) เนื่องจากในประเทศที่มีภูมิอากาศหนาวเย็นนั้น มีการใช้พลังงานเพื่อสร้างความอบอุ่นให้กับที่พักอาศัย โดยพลังงานที่ใช้คิดเป็น 47 % ของพลังงานทั้งหมดที่ผลิตได้ ซึ่งจะเห็นว่าพลังงานที่ใช้มีปริมาณสูงมาก การจัดการพลังงานที่เหมาะสมสามารถลดการใช้พลังงานในส่วนนี้ลงได้โดยการนำเอาพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ซึ่งมีอยู่อย่างไม่จำกัดมาใช้ให้เกิดประโยชน์

ประเทศที่มีภูมิอากาศหนาวเย็นมีการใช้วัสดุ Phase Change Materials (PCMs) ในลักษณะของการจัดการพลังงาน (Energy Management) โดยมีวัตถุประสงค์คือการนำเอาพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยวัสดุ PCMs จะฝังตัวและแพร่กระจายอยู่ในโครงสร้างของสิ่งก่อสร้าง ซึ่งวัสดุ PCMs จะทำหน้าที่ดูดซับ (Adsorb) พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ในเวลากลางวัน ทำให้สามารถป้องกันความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารที่พักอาศัยได้ และในเวลากลางคืน อุณหภูมิภายในอาคารและสิ่งแวดล้อมภายนอกจะต่ำกว่าอุณหภูมิของวัสดุ PCMs ทำให้วัสดุ PCMs สามารถปลดปล่อย (Release) พลังงานความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารที่พักอาศัยเพื่อสร้างความอบอุ่นแก่ผู้พักอาศัยได้ นอกจากนี้การใช้ PCMs ยังสามารถเลื่อนการใช้พลังงานจากช่วงเวลาที่มีการใช้พลังงานสูงสุดมาเป็นช่วงเวลาที่ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุดได้ จึงทำให้ค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้สำหรับการผลิตพลังงานลดลงได้ เนื่องจากประเทศที่มีภูมิอากาศร้อน เช่น ประเทศไทยนั้นการปลดปล่อยพลังงานความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารในเวลากลางคืนนั้นไม่เป็นที่ต้องการ แต่สามารถใช้คุณสมบัติ

ในการดูดซับพลังงานความร้อนเพื่อป้องกันความร้อนของวัสดุ PCMs ให้เกิดประโยชน์ได้ ดังนั้น การศึกษาการใช้งานวัสดุ PCMs สำหรับประเทศที่มีภูมิอากาศร้อนนั้นจึงมีความจำเป็น เพราะสามารถลดการใช้พลังงานได้

ในงานวิจัยนี้มุ่งหวังที่จะนำ PCMs มาใช้ร่วมกับวัสดุก่อสร้างเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน โดยการใช้งานวัสดุ PCMs นั้นจำเป็นจะต้องหาภาชนะมาบรรจุเพื่อป้องกันการรั่วไหลในขณะใช้งาน การดูดซับ PCMs ในรูปของวัสดุรูปทรงแปดหน้าเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการป้องกันการรั่วไหลของ PCMs ในงานวิจัยนี้ วัสดุที่เหมาะสมจะนำมาเป็นตัวดูดซับจะต้องมีรูปทรงแปดหน้า หาได้ง่ายและสามารถนำไปใช้ร่วมกับวัสดุก่อสร้างได้

ปัจจุบันมีการนำเถ้าลอย (Fly ash) มาใช้ร่วมกับวัสดุก่อสร้างนั่นก็คือปูนซีเมนต์ งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะนำเถ้าลอยมาทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ เพราะเถ้าลอยมีรูปทรงแปดหน้า หาได้ง่ายและสามารถนำไปใช้ร่วมกับวัสดุก่อสร้างได้เป็นอย่างดี

วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและพัฒนาการใช้งานวัสดุ PCMs ให้เหมาะสมกับประเทศที่มีภูมิอากาศร้อน โดยใช้ PCMs ผสมลงในซีเมนต์เพื่อช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับความร้อนไม่ให้เข้าสู่ภายในอาคารสิ่งก่อสร้าง
2. ศึกษาวิธีการผลิต PCMs ด้วยวิธี Vacuum Impregnation โดยใช้ถั่วลันเตาเป็นตัวยึด
3. ศึกษาผลกระทบของปริมาณวัสดุ PCMs ที่ใช้ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความแข็งแรงของโครงสร้างอาคารและหาปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานวัสดุ PCMs
4. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานของวัสดุ PCMs ในโครงสร้างอาคารกับอาคารที่ปราศจากการใช้งานวัสดุ PCMs หรือเปรียบเทียบกับอาคารที่มีการติดตั้งฉนวนกันความร้อน เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุ PCMs ในการอนุรักษ์พลังงาน

ขอบเขตการวิจัย

1. ใช้พาราฟินเป็นวัสดุเปลี่ยนสถานะและใช้ถั่วลันเตาเป็นวัสดุรูพรุนในการผลิต Paraffin / Fly ash Composite PCMs
2. ช่วงสภาวะการผลิต Paraffin / Fly ash Composite PCMs
 - 2.1 เวลาสุญญากาศ 30 นาที
 - 2.2 ความดันสุญญากาศ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 นิ้วปรอท
 - 2.3 อุณหภูมิพาราฟิน 65, 90 และ 130 องศาเซลเซียส
 - 2.4 เวลาการแช่ถั่วลันเตาในพาราฟิน 5, 15, 30 และ 60 นาที
3. คุณสมบัติของ Paraffin / Fly ash Composite PCMs ที่วิเคราะห์ได้แก่
 - 3.1 คุณสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)
 - 3.2 ลักษณะรูปร่างด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
 - 3.3 พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนด้วยเครื่อง Autosorb-1
4. ทดสอบผลกระทบของ Paraffin / Fly ash Composite PCMs ต่อความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ด้วยเครื่องทดสอบแรงอัด

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถผลิต PCMs ในรูปแบบของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ได้และสามารถนำคุณสมบัติของ PCMs ที่เก็บสะสมพลังงานความร้อนในรูปของความร้อนแฝงมาใช้ประโยชน์และไม่มีกรรั่วไหลของ PCMs ออกมาจากผลิตภัณฑ์

การตรวจเอกสาร

Phase Change Materials (PCMs)

ในอดีตการเก็บสะสมพลังงานความร้อน (Thermal Energy Storage, TES) จะถูกเก็บสะสมในรูปแบบของ Sensible Heat ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการเก็บสะสมพลังงานความร้อนรูปแบบนี้ ส่วนใหญ่จะเป็นหินและน้ำ แต่เนื่องจากการเก็บสะสมพลังงานความร้อนในรูปแบบนี้มีข้อเสียหลายอย่าง เช่น เกิดการสูญเสียความร้อนระหว่างสะสม วัสดุที่ใช้ในการเก็บสะสมมีน้ำหนักมากและต้องใช้ในปริมาณที่มาก เป็นต้น จากปัญหาที่กล่าวมาจึงทำให้เกิดแนวความคิดที่จะหารูปแบบการเก็บสะสมพลังงานความร้อนรูปแบบใหม่ที่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ คือ การเก็บสะสมพลังงานความร้อนในรูปแบบของความร้อนแฝง (Latent Heat) โดยระหว่างการเก็บสะสมพลังงานความร้อนนั้น วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนสถานะ (Phase Change) และอุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนสถานะจะคงที่จนกว่าวัสดุนั้นจะเกิดการเปลี่ยนสถานะอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเรียกวัสดุที่ใช้เก็บสะสมพลังงานความร้อนรูปแบบนี้ว่าวัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Materials, PCMs) ส่วนพลังงานความร้อนที่ถูกเก็บสะสมจะเรียกว่า Heat of Fusion คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการเก็บสะสมพลังงานความร้อนแบบ Sensible Heat (หินและน้ำ) และความร้อนแฝง (สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์) ได้ถูกเปรียบเทียบไว้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการเก็บสะสมพลังงานความร้อน

Property	Rock	Water	OrganicPCMs	InorganicPCMs
Density, kg/m ³	2,240	1,000	800	1,600
Latent Heat, kJ/kg	-	-	190	230
Latent Heat, kJ/m ³	-	-	152	368
Storage Mass for 106 J, kg	67,000	16,000	5,300	4,350
Storage Volume for 106 J, m ³	30	16	6.6	2.7
Relative Storage Mass	15	4	1.25	1.0
Relative Storage Volume	11	6	2.5	1.0

ที่มา: Mohammed et al. (2003)

PCMs ได้รับความสนใจในการทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงานความร้อน เนื่องจากสามารถเก็บสะสมพลังงานความร้อนได้สูง โดยหลักการทำงานของวัสดุ PCMs คือจะเกิดการเปลี่ยนสถานะเมื่อมีการเก็บสะสมหรือปลดปล่อยพลังงานความร้อน เช่น การเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลว (Solid to Liquid PCMs) หรือการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นก๊าซ (Liquid to Gaseous PCMs) ซึ่งโดยทั่วไปแล้ววัสดุ PCMs นิยมใช้การเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลวมากกว่า เพราะเมื่อเกิดการเปลี่ยนสถานะจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อย และในรอบการทำงานของ PCMs นั้นจะประกอบด้วยการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลวและการคืนสภาพจากของเหลวกลายเป็นของแข็งอีกครั้งหนึ่ง

คุณสมบัติของ PCMs

PCMs ที่ถูกนำมาใช้ในการเก็บสะสมพลังงานความร้อนนั้น ควรพิจารณาคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal Properties) PCMs ที่ดีควรมีคุณสมบัติทางความร้อนดังนี้

ก. อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะหรือจุดหลอมเหลว (Phase Change Temperature or Melting Point) ควรเหมาะสมกับการใช้งาน

ข. มีค่าความร้อนแฝงสูงเพื่อให้เพียงพอต่อการเก็บสะสมพลังงานความร้อน

ค. นำความร้อนได้ดีทั้งในสถานะของแข็งและของเหลวเพื่อที่จะสามารถดูดพลังงานความร้อนและคายพลังงานความร้อนได้อย่างสมบูรณ์

ง. มีค่าความจุความร้อนสูงเพื่อที่จะได้เพิ่มความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานความร้อนแบบ Sensible Heat

2. คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) PCMs ที่ดีควรมีคุณสมบัติทางกายภาพดังนี้

ก. มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นระหว่างการเปลี่ยนสถานะต่ำ ในกรณีที่ PCMs ถูกใช้ในระบบปิด เช่น มีการบรรจุในภาชนะหรือแคปซูลก่อนที่จะนำไปใช้งานการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของวัสดุเปลี่ยนสถานะจะมีความสำคัญมาก เพราะจะมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุ ซึ่งหากปริมาตรมีการขยายเพิ่มขึ้นอาจทำให้ภาชนะหรือแคปซูลเกิดความเสียหายได้

ข. มีความหนาแน่นสูง

ค. ไม่เกิดปัญหา Supercooling หรือ Undercooling ในการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็งเพราะการเกิด Supercooling จะทำให้ PCMs เปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งทำให้ไม่สามารถนำความร้อนที่ PCMs สะสมไว้มาใช้ในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการได้

3. คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Properties) PCMs ที่ดีควรมีคุณสมบัติทางเคมี ดังนี้

ก. มีความเสถียรภาพ (Stability)

ข. ไม่เกิด Phase Separation

ค. ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน (Corrosiveness)

ง. ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ ไม่ระเบิด

ชนิดของ PCMs

PCMs แบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ ดังนี้

1. สารอนินทรีย์ (Inorganic PCMs) ประกอบด้วย เกลือไฮเดรต (Salt Hydrates) เกลือ (Salts) โลหะ (Metals) และโลหะผสม (Alloys) สารอนินทรีย์มีค่าความร้อนแฝงสูง จึงทำให้สามารถเก็บสะสมพลังงานความร้อนได้มาก จากคุณสมบัตินี้ทำให้สารอนินทรีย์ได้รับความสนใจในการนำมาใช้เป็นวัสดุ PCMs อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่า สารอนินทรีย์มีข้อเสียที่เกิด Supercooling ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้การคายความร้อนของวัสดุ PCMs ชนิดนี้ทำได้ไม่ด้นัก ปัจจุบันมีการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาวิธีแก้ไขปัญหาดังกล่าวพบว่า สารอนินทรีย์สามารถหลีกเลี่ยงการเกิด Supercooling ได้ หากอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวไม่เกินอุณหภูมิหลอมเหลวของสารอนินทรีย์นั้นหรืออาจเติมสาร Nuclei เพิ่มลงไปในสารอนินทรีย์นั้นเพื่อช่วยให้เกิดการกลายเป็นของแข็งได้ง่ายขึ้น ตัวอย่างสารอนินทรีย์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุ PCMs แสดงดังตารางที่ 2

2. สารอินทรีย์ (Organic PCMs) ประกอบด้วย พาราฟิน (Paraffin) พอลิแอลกอฮอล์ (Poly alcohol) และกรดไขมัน (Fatty Acids) แม้ว่าสารอินทรีย์จะมีค่าความร้อนแฝงน้อยกว่าสารอนินทรีย์มาก แต่สารอินทรีย์ก็ได้รับความนิยมมากกว่าสารอนินทรีย์ เพราะมีข้อดีหลายประการ เช่น ไม่เกิดปัญหา Supercooling ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน (Non Corrosive) และไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น อย่างไรก็ตามสารอินทรีย์ก็มีข้อเสียเช่นกัน เช่น ติดไฟ (Imflammability) และนำความร้อน

ได้ต่ำ (Low Thermal Conductivity) ตัวอย่างสารอินทรีย์แสดงดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างสารอินทรีย์กับสารอนินทรีย์

ตารางที่ 2 ตัวอย่างสารอนินทรีย์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุ PCMs

สาร	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	ความร้อนแฝงในการหลอมเหลว (จูลต่อกรัม)
$\text{KF} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	18.5	231
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	29.7	171
$\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	30	296
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32.4	254
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	35	281
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	48	201
NaOH	64.3	227.6

ตารางที่ 3 ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุ PCMs

สาร	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	ความร้อนแฝงในการหลอมเหลว (จูลต่อกรัม)
Butyl Stearate	19	140
Paraffin C_{16} - C_{18}	20-22	152
Polyglycol E 600	22	127.2
1-Dodecanol	26	200
1-Tetradecanol	38	205
Paraffin C_{20} - C_{33}	48 - 50	189
Paraffin C_{22} - C_{45}	58 - 60	189

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างสารอินทรีย์กับสารอนินทรีย์

สารอินทรีย์	สารอนินทรีย์
ข้อดี ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน ไม่เกิด Supercooling เสถียรภาพทางเคมีและความร้อน	ข้อดี ความร้อนแฝงสูง
ข้อเสีย ความร้อนแฝงต่ำ นำความร้อนได้ต่ำ ติดไฟ	ข้อเสีย เกิด Supercooling มีฤทธิ์กัดกร่อน เกิด Phase Separation

ที่มา: Belen et al. (2002)

วิธีการใช้ PCMs ร่วมกับโครงสร้างของสิ่งก่อสร้าง

วิธีการที่ใช้ในการรวมตัวกันของ PCMs กับโครงสร้างของสิ่งก่อสร้างมีมากมายหลายวิธี และได้รับการพัฒนารวมทั้งได้มีการคิดค้นวิธีการใหม่ๆ เพื่อปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งวิธีที่ได้มีการศึกษาและได้รับความสนใจในการใช้งานมีดังนี้ คือ

1. การใช้งานโดยตรง (Direct Incorporation) วิธีการนี้เป็นวิธีแรกที่ได้รับการคิดค้นขึ้น เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ต้องใช้อุปกรณ์มากมายในการขึ้นรูปและราคาถูก วิธีการนี้ทำโดยการนำ PCMs มาทำการบดให้เป็นผงละเอียดหรือทำการละลายให้เป็นของเหลว จากนั้นจึงนำเอาผงหรือของเหลว PCMs มาผสมร่วมกับวัสดุก่อสร้างโดยตรง เช่น ยิปซัม คอนกรีต เป็นต้นแล้วจึงนำมาขึ้นรูปต่อไป

2. การแช่วัสดุก่อสร้างใน PCMs หลอมเหลว (Immersion) วิธีการนี้วัสดุก่อสร้างจำเป็นต้องมีรูพรุน เช่น ยิปซัมบอร์ด อิฐ บล็อกคอนกรีต เป็นต้น วัสดุก่อสร้างจะถูกจุ่มลงไปใน PCMs หลอมเหลวแล้วแช่ทิ้งไว้เพื่อให้วัสดุก่อสร้างได้ดูดซับ (Adsorb) PCMs ให้หลอมเหลวเข้าไปยังรูพรุนด้วยแรงคาปิลารี (Capillary Force) จากนั้นจึงนำวัสดุก่อสร้างมาทำให้แห้ง ในส่วนของเวลาที่

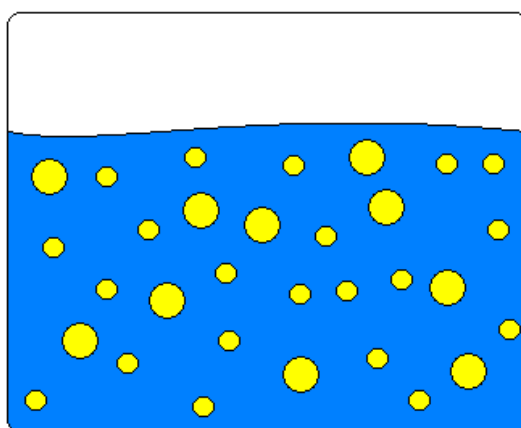
ใช้ในการแช่นั้นโดยมากจะใช้เวลาหลายชั่วโมง แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลว PCMs ความหนืดและขนาดของรูพรุนด้วย

3. การบรรจุ PCMs ในแคปซูล (Encapsulation) เนื่องจากวิธีที่กล่าวมาข้างต้นทั้ง 2 วิธีพบว่า ทุกครั้งที่ PCMs ได้รับพลังงานความร้อนและเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลวนั้นจะมีการรั่วไหลของ PCMs เกิดขึ้น ทำให้ปริมาณของ PCMs ในวัสดุก่อสร้างลดลง ปัญหานี้เป็นปัญหาที่สำคัญมาก เพราะการรั่วไหลของ PCMs จะส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานความร้อน กล่าวคือ ปริมาณของ PCMs จะเป็นตัวกำหนดปริมาณพลังงานความร้อนที่สามารถเก็บสะสมได้ ถ้าปริมาณ PCMs ในวัสดุก่อสร้างลดลง ปริมาณพลังงานความร้อนที่สามารถเก็บสะสมได้ก็จะลดลงไปด้วย จากปัญหาที่กล่าวมาจึงมีการศึกษาค้นคว้าวิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ซึ่งวิธีหนึ่งที่มีความน่าสนใจคือ การบรรจุ PCMs ในแคปซูล โดยแต่เดิมนั้นมีการนำ PCMs มาบรรจุในแคปซูล โดยสามารถทำได้ในระดับแมโครแคปซูล (Macroencapsulation) แม้ว่าจะสามารถป้องกันการรั่วไหลของ PCMs ได้ แต่ Macroencapsulation ก็มีปัญหามากมายเหมือนกัน เช่น วัสดุที่ใช้เป็นแคปซูลส่วนใหญ่จะเป็นหลักกับพอลิเมอร์ซึ่งมีราคาแพง นอกจากนี้ยังมีการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Rate) ระหว่างการคายพลังงานความร้อนเพื่อเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็งที่ต่ำ ทำให้การคายความร้อนเกิดขึ้นได้อย่างไม่สมบูรณ์ และเนื่องจาก Macroencapsulation นั้นมีขนาดใหญ่เมื่อนำไปใช้ในสิ่งก่อสร้าง เช่น กำแพงหรือเพดาน ทำให้ไม่สามารถเจาะหรือตอกตะปูที่สิ่งก่อสร้างได้ เพราะอาจไปเจาะโดน Macroencapsulation แล้วทำให้เกิดความเสียหายได้

การบรรจุ PCMs ในแคปซูลระดับไมโครแคปซูล (Microencapsulation) ได้รับการพัฒนามาจาก Macroencapsulation สามารถแก้ไขปัญหาก็พบใน Macroencapsulation ได้ เนื่องจากมีขนาดที่เล็กมากจึงมีพื้นที่ผิวเยอะ ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้นและสามารถนำไปใช้ในสิ่งก่อสร้างได้อย่างไม่มีปัญหา Microencapsulation ประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนที่ทำหน้าที่เป็น PCMs เรียกว่า Core Materials และส่วนที่ทำหน้าที่เป็นแคปซูลเรียกว่า Coating Materials ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารพอลิเมอร์

วิธีการผลิต Microencapsulation มีด้วยกัน 2 วิธี คือ Complex Coacervation และ Spray Drying Methods วิธีการผลิตทั้ง 2 วิธีนี้จะทำคล้ายกันในตอนแรก คือ เริ่มจากการนำเอา PCMs หลอมเหลวมาผสมกับสารละลายเจลาติน ซึ่งทำหน้าที่เป็น Coating Materials และใช้สาร Tween 80 เป็นตัวทำอิมัลชัน (Surfactant) จากนั้นทำการกวนผสมกันด้วยเครื่อง Homogenizer จะได้ผล

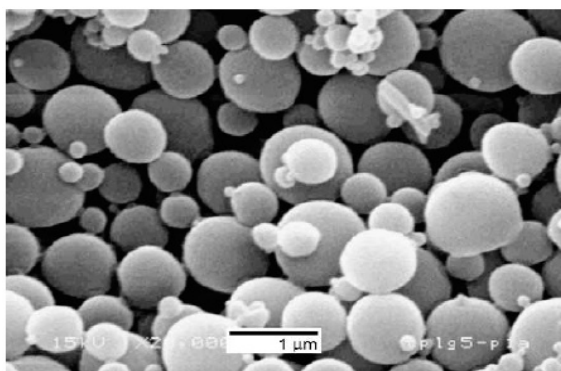
ดังภาพที่ 1 โดยหยดอนุภาคเล็กที่เป็นวัสดุภายในนั้น คือ PCMs ที่ถูกล้อมรอบด้วยสารละลายเจลาตินซึ่งเป็นวัสดุภายนอก การเตรียมด้วยวิธี Complex Coacervation จะทำการเติมสาร Cross Linking Agent ลงไปในอิมัลชันที่ผลิตได้ เพื่อให้หยดอนุภาคเกิดการแข็งตัว หลังจากนั้นจึงทำการแยกออก ส่วนการเตรียมด้วยวิธี Spray Drying จะนำอิมัลชันที่ผลิตได้มาฉีดสเปรย์ด้วยเครื่อง Mini Spray Dryer ซึ่งรูป Microencapsulated ของทั้ง 2 วิธีแสดงดังภาพที่ 2 และ 3



ภาพที่ 1 อิมัลชันที่มีวัสดุภายในเป็นพาราฟินและวัสดุภายนอกสารละลายเจลาติน

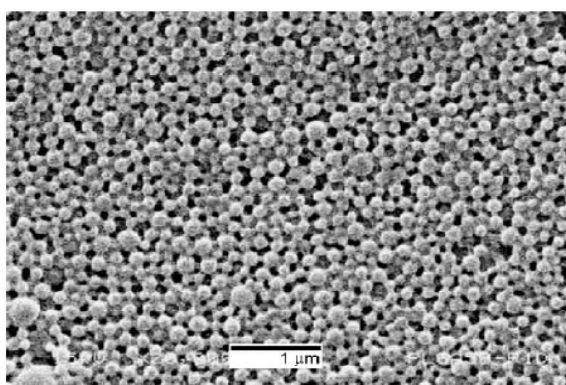
4. การดูดซับ PCMs ในรูพรุนของแกรไฟต์ (Paraffin/Graphite Composite) วิธีนี้แกรไฟต์จะถูกแช่ใน PCMs หลอมเหลว โดยก่อนหน้านี้แกรไฟต์จะต้องถูกนำไปทำการปรับขนาดของรูพรุนก่อนเพื่อที่จะได้สามารถดูดซับ PCMs ได้ดีขึ้น วิธีนี้นอกจากจะสามารถ Encapsulated PCMs ได้แล้วยังสามารถเพิ่มค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของ PCMs ได้ด้วย ทำให้ PCMs สามารถดูดและคายพลังงานความร้อนได้ดีขึ้น เนื่องจากการแช่แกรไฟต์ใน PCMs หลอมเหลวด้วยวิธีธรรมดานั้นมีข้อจำกัดคือ แกรไฟต์สามารถดูดซับ PCMs ได้น้อย จึงได้มีการพัฒนาวิธีการดูดซับขึ้นมาใหม่ โดยใช้ความดันบรรยากาศช่วยในการดูดซับ วิธีนี้เรียกว่า Vacuum Impregnation

วิธี Vacuum Impregnation ทำโดยการนำเอาวัสดุที่มีรูพรุนใส่ลงใน Vacuum Flask และทำการดูดอากาศใน Flask ออกด้วย Vacuum Pump จึงทำให้อากาศในรูพรุนของวัสดุถูกดูดออกไปด้วย หลังจากนั้นจึงเท PCMs ลงไปใน Flask เพื่อให้วัสดุที่มีรูพรุนทำการดูดซับ และทำการปิด Pump ความดันบรรยากาศจากภายนอก Flask จะทำการผลักดัน PCMs ให้เข้าไปในรูพรุนของวัสดุทำให้สามารถดูดซับ PCMs ได้มากขึ้น



ภาพที่ 2 ภาพถ่ายจาก SEM ของ Microencapsulated ที่เตรียมด้วยวิธี Complex Coacervation

ที่มา: Hawlader et al. (2003)



ภาพที่ 3 ภาพถ่ายจาก SEM ของ Microencapsulated ที่เตรียมด้วยวิธี Spray Drying

ที่มา: Hawlader et al. (2003)

5. Form Stable วิธีนี้ประกอบด้วยสาร 2 ชนิด คือ PCMs กับ Supporting Materials ซึ่ง PCMs และ Supporting Materials จะถูกนำมาหลอมเหลวและผสมเข้าด้วยกัน จากนั้นทิ้งให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้องแล้วจึงนำมาใช้งาน โดยทั่วไปแล้ว PCMs กับ Supporting Materials ที่นำมาใช้ร่วมกันจะต้องมีโครงสร้างที่คล้ายกันเพื่อให้ PCMs จะได้ถูก Encapsulated อยู่ในโครงสร้างของ Supporting Materials ได้ เช่น ถ้า PCMs ที่ใช้เป็นพาราฟิน Supporting Materials ที่ใช้ก็ควรจะเป็นสารพอลิเมอร์เพราะสารทั้ง 2 ชนิดมีโครงสร้างคล้ายกัน เป็นต้น

ตัวอย่างการใช้งาน PCMs ในสิ่งก่อสร้าง คือ การสร้างที่พักอาศัยของ David Allam ซึ่งตั้งอยู่ในมลรัฐยูทาห์ ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่พักอาศัยของเค้าได้มีการใช้ Sodium Sulfate Deca-hydrat ($\text{NaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) หรือเกลือ Glauber เป็นสาร PCMs ซึ่งมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 90 ฟาเรนไฮต์ (32.4 องศาเซลเซียส) และมีค่าความร้อนประมาณ 83 แคลอรีต่อกรัม เกลือจะถูกบรรจุอยู่ในท่อเพื่อทำการกักเก็บพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ในเวลากลางวัน ในระหว่างการกักเก็บพลังงานความร้อนนั้น เกลือจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของเหลวและเมื่อถึงเวลากลางคืนซึ่งอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ำกว่าเวลากลางวัน พลังงานความร้อนที่ถูกเก็บสะสมไว้ในเกลือจะถูกปลดปล่อยออกมาเพื่อให้ความอบอุ่นแก่ที่พักอาศัยและเปลี่ยนสถานะกลับไปเป็นของแข็งเช่นเดิม จะเห็นว่าแม้ที่พักอาศัยจะตั้งอยู่ในเขตภูมิอากาศหนาวเย็นก็ไม่จำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงในการให้ความอบอุ่น



ภาพที่ 4 บ้านของ David Allam ที่ใช้ PCMs มาเป็นสารที่ให้ความอบอุ่นภายในบ้านในเวลากลางคืน

ที่มา: David Allam (2000)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ถูกค้นพบโดยชาวโรมัน ด้วยการผสมขี้เถ้าภูเขาไฟและทรายกับน้ำ ชาวโรมันพบว่า วัสดุก่อสร้างจะมีความแข็งแรงกว่าที่ทำจากปูนขาวล้วน ปูนซีเมนต์นี้ถูกเรียกว่า ปูนซีเมนต์พอซซูลอน่า (Pozzuloma Cement) เพราะว่าปูนซีเมนต์นี้ถูกค้นพบครั้งแรกจากขี้เถ้าภูเขาไฟที่พอซซูลอน่า

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้จากการนำวัตถุดิบที่มีสารประกอบของออกไซด์ของแคลเซียม ซิลิกอน อลูมิเนียม และเหล็กมาบดให้ละเอียดแล้วผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสมและป้อนเข้าเตาเผา ซึ่งอุณหภูมิในเตาจะสูงถึงประมาณ $1,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ วัตถุดิบจะหลอมละลายและทำปฏิกิริยาทาง

เคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ดในรูปของผลึกที่ละเอียดมาก ปูนเม็ดจะถูกลดอุณหภูมิลงและนำไปรวมกับยิปซัม องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วย

ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate : $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, C_3A)

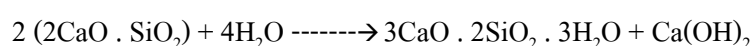
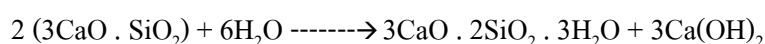
ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate : $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, C_2S)

ไตรแคลเซียมอลูมิเนียม (Tricalcium Aluminate : $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, C_3A)

เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (TetracalciumAluminoFerrite: $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, C_4AF)

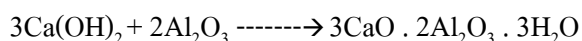
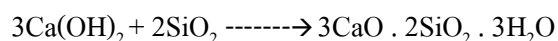
นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นๆอีกที่ได้หลังจากการเผา เช่น MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O และ Na_2O ซึ่งปะปนอยู่จำนวนน้อยเมื่อเทียบกับน้ำหนักของปูนซีเมนต์ จำนวนของสารประกอบเหล่านี้ที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ชนิดหนึ่งๆไม่เท่ากัน ประเภทของปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับจำนวนของสารประกอบเหล่านี้

ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน แสดงดังสมการต่อไปนี้



วัสดุปอซโซลาน

ASTM C 318 ได้ให้คำจำกัดความไว้ว่า วัสดุปอซโซลาน หมายถึง วัสดุที่มีซิลิกา (Siliceous) หรือซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and Aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ว วัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสานหรือมีน้อยมาก แต่หากมีความละเอียดมากๆ และมีความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้เกิดสารประกอบที่มีวัสดุเป็นวัสดุประสาน ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) วัสดุปอซโซลานที่รู้จักกันโดยทั่วไป ได้แก่ เถ้าลอย ซิลิกาฟูม เถ้าแกลบ เป็นต้น ปฏิกิริยาปอซโซลานแสดงดังสมการต่อไปนี้



เถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นผลพลอยได้ (By Product) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน ถ่านหินที่มีขนาดใหญ่จะตกลงยังก้นเตาจึงเรียกกันว่าเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึงประมาณ 200 ไมโครเมตร จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบบริเวณโรงไฟฟ้า ถ่านหินที่ใช้ในการเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ามี 4 ชนิดด้วยกันคือ แอนทราไซต์ (Antracite) บิทูมินัส (Bituminous) ซับบิทูมินัส (Sub Bituminous) ลิกไนต์ (Lignite) การเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้ามีใช้กันอยู่ 3 ระบบด้วยกัน ได้แก่

1. การเผาความร้อนสูง ใช้อุณหภูมิในการเผาอยู่ที่ $1,500 - 1,700\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้แรงลม (Cyclone Combustion) ที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะหลอมละลายและปะทะรวมกันเป็นเม็ดหรือก้อน เถ้าถ่านหินที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าก้นเตาและตกลงในอ่างน้ำข้างล่าง เถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะเป็นเถ้าลอยซึ่งในระบบการเผาแบบนี้จะมีปริมาณค่อนข้างน้อยเถ้าถ่านหินที่ได้จะมีลักษณะเป็นแก้วเม็ดใสๆ (Vitreous Particle)

2. การเผาความร้อนปานกลาง ใช้อุณหภูมิในการเผาอยู่ที่ $1,100 - 1,400\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized Coal Combustion) เถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าที่เหลือจะเป็นเถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตา เถ้าลอยที่ได้จากการเผามีประมาณร้อยละ 70 – 90 มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน เป็นเถ้าลอยที่เหมาะสมสำหรับใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อทำคอนกรีต โรงงานไฟฟ้าแม่เมาะใช้การเผาลักษณะนี้

3. การเผาความร้อนต่ำ ใช้อุณหภูมิในการเผาค่อนข้างต่ำไม่เกิน $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นการเผาในเตาแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized Bed Combustion) เถ้าถ่านหินที่ได้มีรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular) และมีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากเถ้าหินที่ได้ไม่ได้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่สูงพอ แม้จะสามารถใช้เป็นสารปอซโซลานได้ แต่ไม่ดีเท่าเถ้าลอยที่ได้จากการเผาความร้อนปานกลาง อย่างไรก็ตามวิธีการเผาแบบนี้เริ่มมีใช้มากขึ้นสำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กในโรงงานต่างๆ

โดยทั่วไปเถ้าลอยจะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญอยู่ 3 ชนิด คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (ประมาณร้อยละ 25-60) อลูมิเนียมออกไซด์ (ประมาณร้อยละ 10-30) และเฟอริกออกไซด์ (ประมาณร้อยละ 5-25) หากผลรวมขององค์ประกอบทั้ง 3 นี้มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 70 ASTM จัดเถ้าลอยดังกล่าวเป็นเถ้าลอย Class F สำหรับเถ้าลอย Class C ส่วนใหญ่จะมีสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ในปริมาณสูง ดังนั้น ASTM จึงกำหนดผลรวมขององค์ประกอบหลักทั้ง 3 ชนิด ดังกล่าวให้มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 50 เท่านั้น ตารางที่ 5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยจาก 5 แหล่งที่ผลิตได้ในประเทศไทย

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยจาก 5 แหล่งที่ผลิตได้ในประเทศไทย

แหล่งผลิต	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
ปูนซีเมนต์	20.62	5.22	3.10	64.99	0.91	0.07	0.50	2.70
แม่เมาะ	46.25	26.43	10.71	7.61	2.21	1.11	3.07	1.85
ระยอง	45.02	36.21	4.09	3.64	0.54	0.44	0.31	0.48
สมุทรสาคร	43.92	36.62	3.97	3.05	0.55	0.38	0.44	0.64
กาญจนบุรี	47.39	22.73	6.29	8.36	2.64	0.63	2.95	3.38
ต่างประเทศ	49.04	37.91	2.75	1.03	0.39	0.38	0.52	0.18

ที่มา: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (2544)

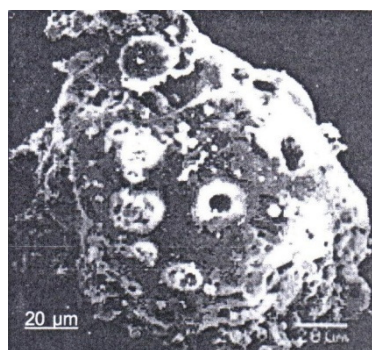
คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

เถ้าลอยซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งตั้งอยู่ในที่ต่าง ๆ กันหรือมาจากแหล่งถ่านหินต่างกัน อาจมีสีต่างกัน ได้ สีของเถ้าลอยและปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ในคอนกรีตจะส่งผลกระทบต่อสีของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเช่นเดียวกับการเปลี่ยนสีของปูนซีเมนต์หรือการเปลี่ยนวัสดุผสม โดยทั่วไปสีของเถ้าลอยไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีต แต่อาจเป็นตัวบ่งชี้ว่าเถ้าลอยมาจากแหล่งที่ต่างกัน หรือมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา และมีปริมาณเหล็กต่างกัน หรือผ่านสภาพการเผาที่แตกต่างกัน

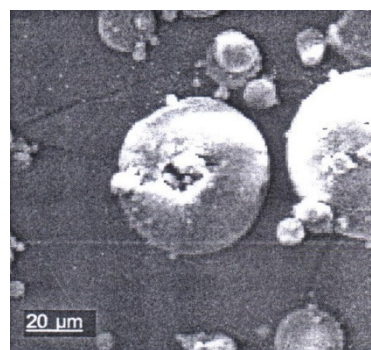
1. รูปร่างของอนุภาค ขนาดอนุภาคและรูปร่างของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับแหล่งถ่านหิน ความสม่ำเสมอของถ่านหิน ความละเอียดของผงถ่านหินก่อนเผา สภาพการเผา (ระดับอุณหภูมิและปริมาณออกซิเจน) ความสม่ำเสมอของการเผาและวิธีดักจับเถ้าลอยที่ใช้ อนุภาคเถ้าลอยส่วนใหญ่จะไม่ใช่ผลึกและจะมีรูปร่างกลมซึ่งอาจตันหรือกลวง ลักษณะทรงกลมที่ภายในกลวง เรียกว่า เถ้าลอยกลวง (Cenospheres) บางส่วนจะเป็นทรงกลมกลวงบรรจุด้วยอนุภาคเล็กๆ อยู่ภายในที่รู้จักกันในนามของ Plerospheres ดังแสดงในภาพที่ 5 นอกจากนี้ยังมีลักษณะอื่นๆ อีกคือ โปร่งแสงจนถึงทึบแสง มีรูพรุนน้อยจนถึงมาก มีรูปร่างที่กลมจนถึงรูปร่างที่ยาวแบน เถ้าลอยที่มีรูพรุนมากๆ มักจะเกิดจากการเผาถ่านหินด้วยอุณหภูมิที่ไม่สูงพอที่จะทำให้เถ้าลอยหลอมเหลวได้

2. ความละเอียด อนุภาคของเถ้าลอยมีหลากหลายขนาดตั้งแต่ขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึงขนาดใหญ่กว่า 1 ไมโครเมตร โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแบบเก่ามักใช้วิธีดักจับเถ้าลอยโดยการแยกเชิงกล ซึ่งจะได้เถ้าลอยที่มีขนาดหยาบกว่าเมื่อเทียบกับเถ้าลอยที่ได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแบบใหม่ ซึ่งดักจับเถ้าลอยด้วยเครื่องดักจับแบบไฟฟ้าสถิต หรือใช้ถุงเก็บเถ้าลอยที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุพอลิโซลัน ความละเอียดเป็นปัจจัยในการบ่งชี้คุณสมบัติของเถ้าลอยที่ดีอย่างหนึ่งเมื่อผสมในคอนกรีต ความละเอียดของเถ้าลอยสูงจะพบว่ามีคุณสมบัติที่ดีของคอนกรีตเพิ่มขึ้นด้วย

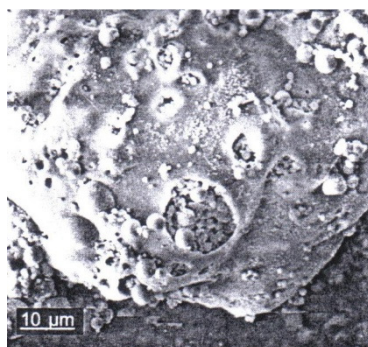
3. ความถ่วงจำเพาะ เถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะระหว่าง 1.97 ถึง 3.02 แต่โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 2.2 – 2.8 หากทำการแยกให้มีขนาดเล็กลง มีความละเอียดสูงขึ้น ความถ่วงจำเพาะก็จะเพิ่มขึ้นเพราะเถ้าลอยขนาดใหญ่มีรูพรุนสูงกว่าเถ้าลอยที่มีขนาดเล็ก เถ้าลอยที่มีอนุภาคกลวงอาจลอยน้ำได้ เนื่องจากมีความถ่วงจำเพาะของอนุภาคโดยรวมน้อยกว่า 1.0 ความถ่วงจำเพาะที่สูงมักเป็นตัวบ่งชี้ว่าอนุภาคส่วนใหญ่มีความละเอียดสูงและตัน เนื่องจากเถ้าลอยที่อนุภาคหยาบมักมีอนุภาคที่กลวงปนอยู่ค่อนข้างมาก



ก.) Cenospheres ขนาด 10 ไมโครเมตร



ข.) Plerospheres ขนาดเล็ก



ค.) Plerospheres ขนาดใหญ่

ภาพที่ 5 รูปร่างลักษณะของเถ้าลอยที่ถ่ายโดย SEM

ที่มา: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (2544)

Differential Scanning Calorimetry

Differential Scanning Calorimetry หรือ DSC เป็นเทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน โดยใช้วิธีการพิจารณา Heat Flow ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงของสารที่ทดสอบ เครื่อง DSC เป็นเครื่องมือที่ใช้ช่วยในการตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อนทั้งในเชิงฟิสิกส์และเคมีของสารที่ไม่ทราบส่วนประกอบ หรือ สารที่ไม่ทราบลักษณะการเปลี่ยนสถานะ การทดสอบโดยใช้เครื่อง DSC จะสามารถให้ทั้งค่าเชิงปริมาณและคุณภาพทั้งในกระบวนการ Endothermic (ดูดความร้อน) และ Exothermic (คายความร้อน) โดยชุดเครื่องมือ DSC แสดงดังภาพที่ 6 เครื่อง DSC มีประโยชน์อย่างมากในการตรวจสอบสารตัวอย่างชนิดเดียวกัน โดยพิจารณาที่ความเหมือนและแตกต่างของสารเจือปนซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติทางความร้อนของสาร



ภาพที่ 6 ชุดเครื่องมือ DSC

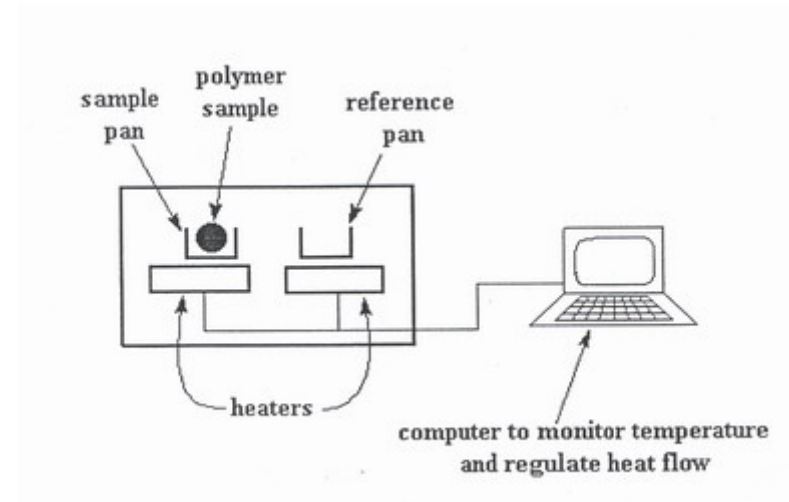
เครื่อง DSC มีหลักการทำงานในการทดสอบสารตัวอย่าง โดยการนำสารตัวอย่างบรรจุลงในถ้วยอลูมินาขนาดเล็ก และนำถ้วยอลูมินาที่บรรจุสารตัวอย่าง กับถ้วยอลูมินาเปล่าซึ่งใช้เป็นตัวอ้างอิงวางลงบน DSC Apparatus จากนั้นเครื่อง DSC จะวัดพลังงานความร้อนที่ดูดกลืน (absorbed) หรือคายออกมา (released) จากการให้ความร้อนและความเย็นแก่ตัวอย่างทดสอบที่อัตราการเพิ่มและลดของอุณหภูมิคงที่ โดยอาศัยหลักการความแตกต่างของพลังงานที่ให้แก่สารตัวอย่าง และตัวอ้างอิงที่แสดงค่าออกมาเป็นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงกับค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนไป โดยที่ได้ DSC Apparatus จะมีอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิ (Pt Resistance Thermometers) และอุปกรณ์ทำความร้อน (Resistance Heater) ซึ่งการให้ความร้อนในอัตราจำเพาะขึ้นอยู่กับผู้ทดสอบโดยกำหนดค่าได้ที่เครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ค่าอัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ตัวอย่างค่าที่ได้จากการทดสอบเช่น

- Glass transition temperature (T_g)
- Melting Point and Heat of Melting
- Degree of Crystallinity
- Thermal Degradation
- Specific Heat

กรณีที่สารตัวอย่างไม่มีการเปลี่ยนสถานะ ขณะทำการทดสอบค่า Heat Flux ของสารตัวอย่างจะคงที่ แต่ในกรณีที่สารตัวอย่างมีการเปลี่ยนสถานะ อุณหภูมิของสารตัวอย่างและตัวอ้างอิง

จะแตกต่างกัน ในช่วงนี้เครื่อง DSC จะมีการให้พลังงานกับสารตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสารตัวอย่างและตัวอ้างอิงจะลดต่ำลง โดยปกติค่าความแตกต่างของอุณหภูมิจะต้องมีค่าน้อยกว่า 0.01 องศาเซลวิน โดยพลังงานที่ให้กับสารตัวอย่างต่อหน่วยเวลาจะถูกบันทึกไว้ในรูปของอุณหภูมิ

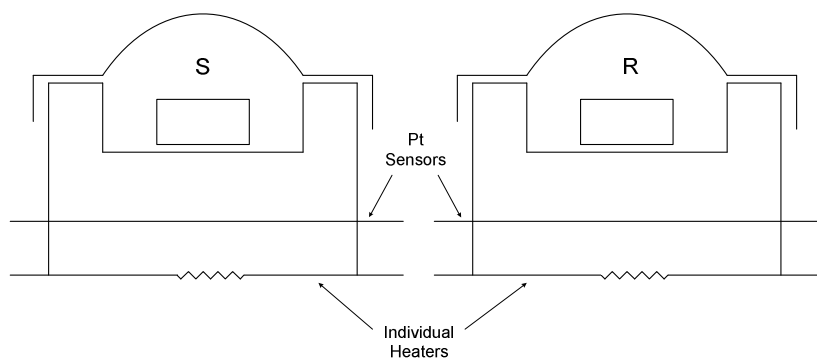
ในการทดสอบด้วยเครื่อง DSC หากมีการให้พลังงานเพิ่มกับสารตัวอย่าง แสดงว่าเป็นกระบวนการดูดพลังงาน แต่หากในการทดสอบมีการให้พลังงานกับตัวอ้างอิง แสดงว่าเป็นกระบวนการคายพลังงาน โดยตามหลักการของ Thermodynamics การเกิดการให้พลังงานจากสิ่งแวดล้อมเข้าไปในระบบ ค่าพลังงานจะเป็นบวก สำหรับในการทดสอบด้วยเครื่อง DSC นี้ ถ้าเครื่อง DSC มีการให้พลังงานกับสารตัวอย่าง เป็นกระบวนการดูดความร้อน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (ΔH) จะเป็นบวก ช่วงอุณหภูมิที่เครื่อง DSC สามารถให้พลังงานชดเชยได้ อยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 110 ถึง 1,000 องศาเซลวิน



ภาพที่ 7 ชุดอุปกรณ์สำคัญของเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)

ที่มา: Gaelle and Helenne (2001)

จากภาพที่ 7 เป็นรูปแสดงชุดอุปกรณ์สำคัญของเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ถ้วยอลูมินาที่บรรจุสารตัวอย่างและถ้วยอลูมินาเปล่าที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงจะถูกวางอยู่บน DSC Apparatus ซึ่งจะมีตัว Resistance Sensor ใช้วัดอุณหภูมิของแต่ละถ้วยและมีตัว Resistance Heater เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนติดอยู่ ตำแหน่งการจัดเรียงอุปกรณ์ที่บรรจุถ้วยอลูมินาแสดงอยู่ในภาพที่ 8



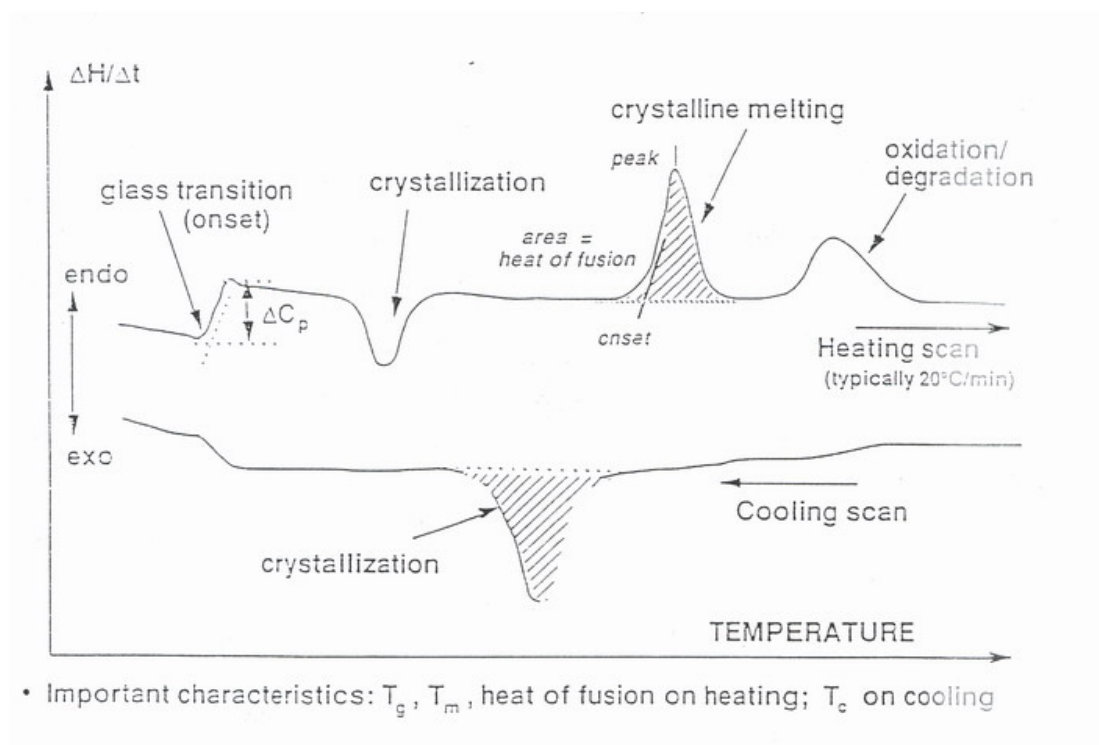
ภาพที่ 8 ตำแหน่งการจัดวางอุปกรณ์ของ DSC Apparatus

ที่มา: Gaelle and Helenne (2001)

อุปกรณ์ทั้ง 2 ตัวดังกล่าวมีหลักการทำงาน คือ ขณะทดสอบเครื่องจะพยายามรักษาอุณหภูมิของทั้ง 2 ถ้วยให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด หากค่าอุณหภูมิของทั้ง 2 ถ้วยที่วัดได้แตกต่างกัน อุปกรณ์ทำความร้อนก็จะทำงานจนกระทั่งอุณหภูมิของทั้ง 2 ถ้วยกลับมาใกล้เคียงกันอีกครั้ง

อุปกรณ์หลักที่สำคัญอีกตัวหนึ่งของการทดสอบ Differential Scanning Calorimetry (DSC) คือ เครื่องคอมพิวเตอร์ โดยเครื่องคอมพิวเตอร์จะใช้ควบคุมค่าการทดสอบต่างๆ เช่น ช่วงอุณหภูมิของการทำงาน อัตราการให้ความร้อนหรืออัตราการให้ความเย็น การไหลของ Purge Gas รวมถึงรวบรวมข้อมูล เก็บข้อมูล และแสดงข้อมูลที่ไดจากการทดสอบในหลายๆรูปแบบ

การใช้ประโยชน์จากเครื่อง DSC ในปัจจุบันจะใช้ทดสอบกับสารจำพวกพอลิเมอร์เป็นส่วนใหญ่ โดยค่าที่เครื่อง DSC สามารถทดสอบได้มีดังที่แสดงในภาพที่ 21 (ค่าที่แสดงในภาพที่ 9 ไม่จำกัดเฉพาะแต่คุณสมบัติของพอลิเมอร์เท่านั้น)



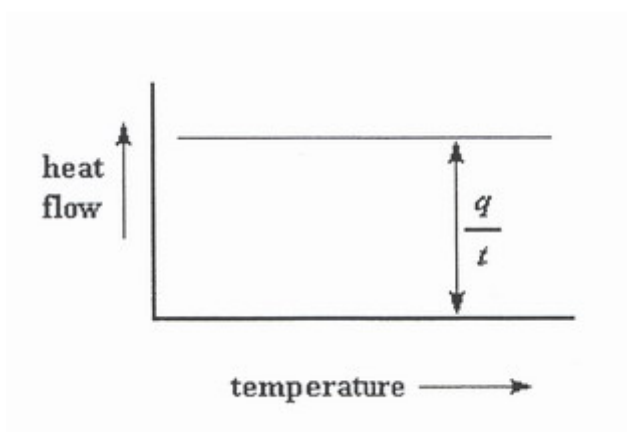
ภาพที่ 9 คุณสมบัติต่างๆที่ทดสอบได้จากเครื่อง DSC

ที่มา: Gaelle and Helenne (2001)

ภาพที่ 9 จะแสดงการหาค่าคุณสมบัติต่างๆจากกราฟที่ได้จากการทดสอบสารตัวอย่างด้วยเครื่อง DSC โดยในเอกสารนี้จะขอกล่าวถึงรายละเอียดการหาค่าจากกราฟผลการทดสอบเฉพาะ 3 ค่าที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้เท่านั้น ได้แก่ ค่าความจุความร้อน ค่าความร้อนแฝงและจุดหลอมเหลวของสาร

1) ค่าความจุความร้อน (Heat Capacity)

เมื่อเริ่มต้นให้ความร้อนแก่ถ้วยทั้งสองที่ใช้ทดสอบ เครื่องคอมพิวเตอร์จะพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความร้อนของถ้วยทั้งสองกับอุณหภูมิ หรือในอีกความหมายหนึ่ง คือ เป็นกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่พอลิเมอร์ดูดซึมกับอุณหภูมิ ภาพที่ 10 แสดงตัวอย่างกราฟในช่วงเริ่มแรกของการทดสอบ



ภาพที่ 10 ตัวอย่างกราฟในช่วงเริ่มแรกของการทดสอบสารตัวอย่างด้วยเครื่อง DSC

ที่มา: Gaelle and Helenne (2001)

จากภาพที่ 10 ค่า Heat Flow คือ ค่าความร้อน q ที่เป็นอัตราส่วนกับเวลา t และค่า Heating Rate ซึ่งผู้ทดสอบจะสามารถกำหนดได้ที่เครื่องคอมพิวเตอร์ก่อนทำการทดสอบ คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น T ต่อเวลา t ดังนี้

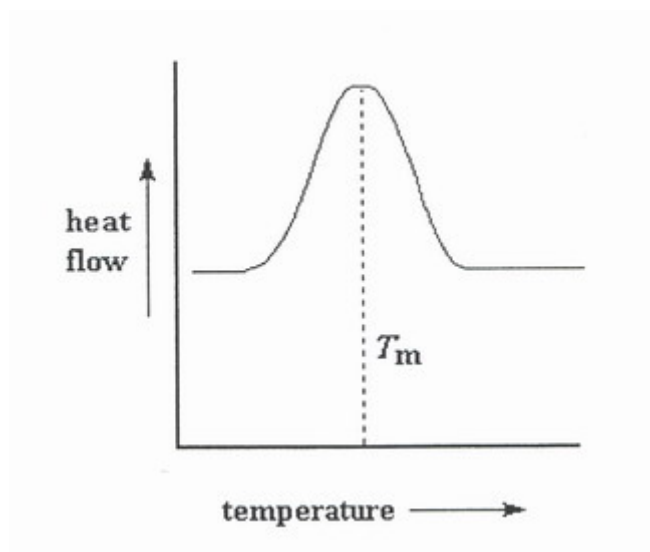
$$\frac{\text{Heat}}{\text{Time}} = \frac{q}{t} = \text{Heat Flow} \quad (1)$$

$$\frac{\text{Temperature Increase}}{\text{Time}} = \frac{\Delta T}{t} = \text{Heating Rate} \quad (2)$$

จากสมการที่ (1) และสมการที่ (2) เมื่อนำ Heat Flow มาหารด้วย Heating Rate ค่าที่ได้จะเป็นค่าความร้อนที่ได้หารด้วยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งก็คือค่าความจุความร้อนนั่นเอง

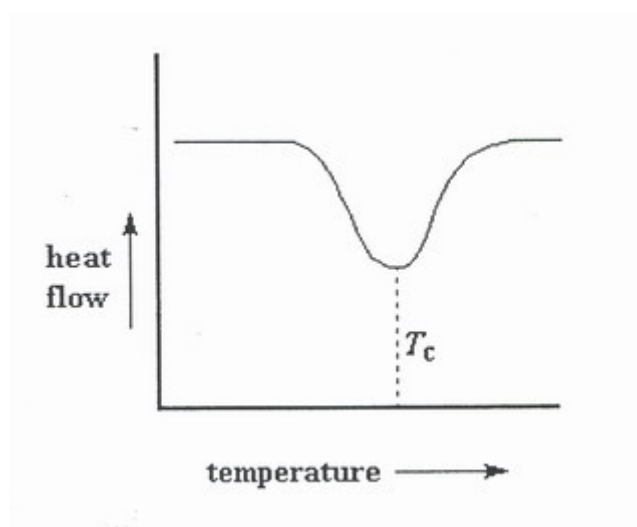
$$\frac{\text{Heat Flow}}{\text{Heating Rate}} = \frac{\frac{q}{t}}{\frac{\Delta T}{t}} = \frac{q}{\Delta T} = C_p = \text{Heat Capacity}$$

2) Melting Temperature และ Crystallization Temperature



ภาพที่ 11 กราฟที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC สำหรับกระบวนการดูดความร้อน

ที่มา: Gaelle and Helenne (2001)



ภาพที่ 12 กราฟที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC สำหรับกระบวนการคายความร้อน

ที่มา: Gaelle and Helenne (2001)

จากกราฟภาพที่ 11 เป็นกระบวนการดูดความร้อน ต้องให้พลังงานเพิ่มเพื่อให้พอลิเมอร์หลอมเหลว อุณหภูมิที่จุดยอดสุดของกราฟคือ จุดหลอมเหลว (T_m) กราฟภาพที่ 12 แสดงกรณีที่เป็นกระบวนการคายพลังงาน อุณหภูมิที่จุดต่ำสุดของกราฟจะเรียกว่า Crystallization Temperature (T_c)

3) ความร้อนแฝง (Latent Heat)

ค่า Latent Heat of Melting และ Latent Heat of Crystallization หาจากพื้นที่ใต้กราฟ ตัวอย่างกราฟที่แสดงในภาพที่ 11 ค่า Latent Heat of Melting คือ พื้นที่ใต้กราฟช่วงตั้งแต่เส้นกราฟเริ่มเพิ่มสูงขึ้นไปหาจุดสูงสุดจนกระทั่งกลับมาที่เส้นระดับปกติอีกครั้ง เช่นเดียวกับกราฟภาพที่ 12 ค่า Latent Heat of Crystallization จะอ่านจากพื้นที่ใต้กราฟช่วงที่กราฟเริ่มลดต่ำลงจนถึงจุดต่ำสุด และกลับขึ้นไปอยู่ในระดับเดิมอีกครั้ง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

Chahroudi (1976) ได้อธิบายเกี่ยวกับการใช้งานวัสดุจำพวก Thermocrete Materials ในรูปแบบทั่ว ๆ ไป โดยเทอร์โมครีต (Thermocrete) คือตัวกลางในการสะสมความร้อนร่วมกับสาร PCMs ในรูปแบบของ Concrete Matrix ซึ่งจะทำให้สามารถสะสมความร้อนได้อย่างทั่วถึง บล็อกเทอร์โมครีตได้ถูกวิเคราะห์โดยเจาะจงพิจารณาในรายละเอียดของการใช้งาน การระบุประสิทธิภาพ และการประหยัดพลังงานในการนำไปประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่างๆ วัสดุสะสมพลังงานความร้อนเทอร์โมครีต ถูกสร้างขึ้นด้วยการผสมสาร PCMs ด้วยซีเมนต์ (Pen Cell Cements) ก็จะได้วัสดุสะสมพลังงานความร้อนราคาถูกที่มีโครงสร้างและมีคุณสมบัติทางเทอร์โมพลาสติก

Keld and Stovall (1989) ได้เสนอแนวคิดในการเติม Octadecane Wax ลงในผนังวอลล์บอร์ด (Wallboard) สำหรับการประยุกต์ใช้ด้าน Passive Solar Application ซึ่งได้รับการผลักดันจาก The Oak Ridge National Laboratory (ORNL) – Thermal Energy Storage Program จากผลของความพยายามในครั้งนี้ทำให้กระบวนการจุ่มแช่ (Immersion Process) สำหรับการเคลือบผนังวอลล์บอร์ดด้วยแว็กซ์ (Wax) ประสบความสำเร็จจากชิ้นงานทดลองขนาดเล็กสู่ชิ้นงานขนาดใหญ่ การวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่ากระบวนการจุ่มแช่เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ วัสดุจะมีค่าความจุความร้อนสูงกว่าวิธีการเติมแว็กซ์ในรูปแบบเกล็ดลงในผนังวอลล์บอร์ดในช่วงกระบวนการผลิต แบบจำลองการวิเคราะห์เพื่อควบคุมการเปลี่ยนสถานะของผนังวอลล์บอร์ดสำหรับการใช้ประโยชน์จาก Passive Solar Application ได้ถูกประยุกต์ใช้ขึ้น

Shapio (1989) ได้แสดงให้เห็นว่า PCMs หลายชนิดมีความเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในผนังยิปซัม (Gypsum Wallboard) ซึ่งนำมาใช้ประโยชน์สำหรับการเก็บความร้อนสำหรับสภาพอากาศของฟลอริดา (Florida) วัสดุเหล่านี้เกิดจากการผสมของ Methyl Esters, Methyl Palmitate และ Methyl Stearate และส่วนผสมของ Short Chain Acid, Caprice Acid และ Lauric Acid แม้ว่าวัสดุเหล่านี้จะมีความร้อนแฝงสูง แต่ช่วงอุณหภูมิที่ต้องการในการเก็บความร้อน ไม่ได้ลดลงอย่างเพียงพอภายในช่วงอุณหภูมิที่ทำให้รู้สึกสบายในอาคารที่ตั้งอยู่ในภูมิอากาศร้อน Neeper พบว่าการเก็บความร้อนของผนังฉนวนบอร์ดที่มีส่วนผสมของ PCMs นั้นเพียงพอที่จะเก็บความร้อนจำนวนมากที่ได้รับโดยตรงจากแสงอาทิตย์

Salzer and Sircar (1990) ได้ค้นพบ Linear Alkyl Hydrocarbon PCMs จากการกลั่นปิโตรเลียม ซึ่งสารนี้มีความเหมาะสมเนื่องจากมีราคาถูก และได้มีการพัฒนาวิธีในการเติม PCMs ลงในพลาสเตอร์บอร์ด (Plasterboard) เพื่อลดการรั่วและปัญหาของการขยายตัวในขณะที่มีการหลอมละลายและการแข็งตัว กระบวนการที่ใช้ในการผสม PCMs ลงไปในพลาสเตอร์บอร์ดนั้นทำได้ทั้งโดยการดูดซับ PCMs เหลวเข้าไปในช่องว่างของพลาสเตอร์บอร์ดหลังกระบวนการผลิต หรืออาจจะเติม PCMs ลงไปในขั้นตอนการผลิตในขณะที่พลาสเตอร์บอร์ดยังเปียกอยู่ ซึ่งพบว่าประสบความสำเร็จ

Hawes and Feldman (1990) ได้พิจารณาวิธีการผสม PCMs โดยการผสมโดยตรง (Direct Incorporation) การจุ่มแช่ (Immersion) และการบรรจุภายในแคปซูล (Encapsulation) ในวิธีที่สามสามารถนิยามการบรรจุ PCMs ภายในแคปซูล ที่มีการเปลี่ยนแปลงวัสดุ รูปแบบและขนาดในลำดับของการผสม ดังนั้นจึงควรที่จะแนะนำถึงวิธีการผสมที่สะดวก โดยจะมีสองหลักการสำหรับตัวกลางในการผสม หลักการแรกคือ Microencapsulation โดยการใช้วัสดุทรงกลมขนาดเล็กหรืออนุภาคที่มีรูปร่างเป็นหลอดปลายปิดบางๆ มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และอนุภาคนี้อาจจะถูกเคลือบด้วยฟิล์มพอลิเมอร์ (Polymeric Film) จากนั้นจะรวมตัวกันอย่างเหมาะสมด้วย Encapsulating Film นั้นหมายความว่าฟิล์มต้องเหมาะสมสำหรับ PCMs และช่องว่าง หลักการที่สองคือนำ Microencapsulation มาบรรจุลงไปในตัวบรรจุ เช่น ท่อ กระเป๋ วัสดุทรงกลม พาเนล หรือที่รองรับอื่นๆ ตัวบรรจุเหล่านี้จะถูกใช้งานโดยตรงเหมือนกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หรือรวมเข้าไปอยู่ในอุปกรณ์ก่อสร้าง PCMs จำเป็นต้องถูกใส่ในแคปซูลเพื่อ PCMs จะได้ไม่กระทบหรือทำปฏิกิริยากับวัสดุก่อสร้าง ในการทดลองก่อนหน้านี้เกี่ยวกับการบรรจุในขนาดมาโครหรือ Macroencapsulation ล้มเหลวเนื่องจากความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ต่ำของ PCMs เมื่อ PCMs ได้รับความร้อนและเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว PCMs จะกลับเป็นของแข็งในตำแหน่งที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน แต่ด้วยเทคโนโลยี

ของ Microencapsulation ทำให้ขนาดของอนุภาคเล็กมาก จนไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ Microencapsulation คือการยอมให้ PCMs รวมตัวกันอย่างง่าย ๆ เข้าไปในโครงสร้างของวัสดุ ทั้งสองวิธีการในการผสม PCMs ในคอนกรีตอาจจะมีข้อเสียบางอย่างคือ พลาสติกหรือโลหะที่ใช้เป็นแคปซูลสำหรับฝัง PCMs มีราคาแพง แต่ปลอดภัยเหมือนกับ PCMs ไม่สัมผัสกับคอนกรีตโดยตรง วิธีการจุ่มแข็ง PCMs ในคอนกรีตโดยตรงแบบดั้งเดิมนั้นได้ผลดี แต่ก็มีผลทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างของคอนกรีตลดลง

Peippo et al. (1991) ได้แสดงให้เห็นว่าบ้านที่มีขนาด 120 ตารางเมตรใน Madison, Wisconsin (43 องศาเหนือ) สามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 4 จิกะจูลต่อปี (หรือ 45 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมดต่อปี) สรุปว่าการเก็บความร้อนในช่วงเวลากลางวันที่เหมาะสมเกิดขึ้นที่อุณหภูมิหลอมเหลว ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิห้องเฉลี่ย 1 - 3 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ได้ทำผนัง PCMs ที่สามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ของมูลค่าที่เกิดขึ้นจากบ้านพักอาศัย

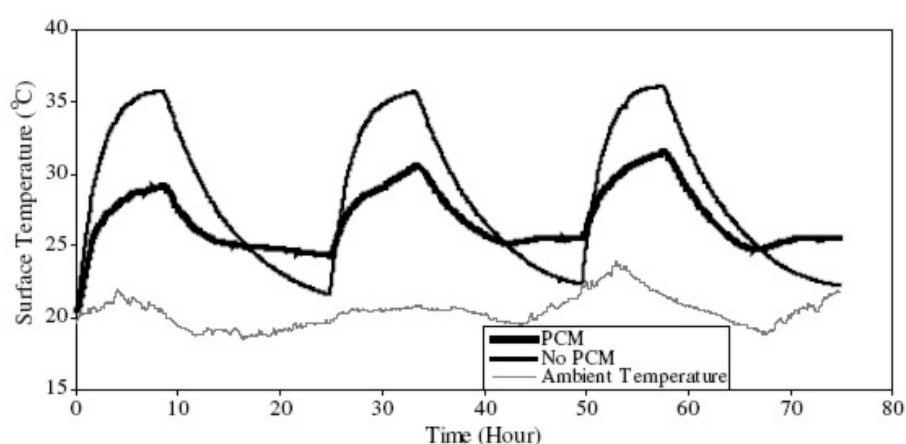
Hawes and Feldman (1992) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนของสาร PCMs (BS, Dodecanal, Paraffin and Tetradecanol) ในคอนกรีตบล็อกต่างชนิดกัน โดยในการศึกษาได้ครอบคลุมถึงผลกระทบของความเป็นต่างของคอนกรีต อุณหภูมิ เวลาที่ใช้และความเงาของสาร PCMs ที่เกิดขึ้นกับการดูดซับของสาร PCMs ในระหว่างกระบวนการจุ่มแข็ง (Impregnation) และได้พิจารณากลไกของการดูดซับ และตั้งแนวทางในการพัฒนาโดยใช้การดูดซับสาร PCMs อย่างคงที่ในคอนกรีต เพื่อให้ได้ค่าของการแพร่กระจายของสาร PCMs ตามต้องการ และได้ค่าความสามารถในการสะสมความร้อนตามที่ต้องการ สิ่งที่ได้จากการปรับปรุงคอนกรีตโดยเทคนิคการผสมสาร PCMs นี้ทำให้ความสามารถในการเก็บสะสมความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 300 เปอร์เซ็นต์

Lee et al. (2000) ได้ศึกษาและแสดงให้เห็นถึงผลการทดสอบในระดับมาโครสเกล (Macro Scale) ในการเปรียบเทียบสมรรถภาพการสะสมความร้อนของบล็อกคอนกรีตที่ผสมสาร PCMs แตกต่างกันสองชนิด คือ BS และ Commercial Paraffin (P) โดยบล็อกคอนกรีต 2 ชนิดได้ถูกนำมาทดสอบและเปรียบเทียบกัน Regular Block (R) ที่ผลิตจากคอนกรีตของประเทศโปแลนด์ และ Autoclaved Block (A) ซึ่งผลิตจากคอนกรีตของประเทศโปแลนด์ผสมกับซิลิกา การชุบกระทำโดยการจุ่มคอนกรีตร้อนๆ ลงใน PCMs เหลว จนกระทั่งได้ PCMs ที่ถูกดูดซับในคอนกรีต 3.9 - 8.6 เปอร์เซ็นต์ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าบล็อกคอนกรีตจะสามารถเก็บสะสมความร้อนแฝง และความร้อนที่สามารถสัมผัสได้ดีเช่นเดียวกับความร้อนแฝงของคอนกรีต ด้วยวิธีนี้จะทำให้การทำความร้อน

หรือความเย็นจากเครื่องใช้ทั่วไปจะถูกเลื่อนไปจากช่วงเวลาที่ต้องการการใช้พลังงานสูง (Demand Time)

Hadjieva et al. (2000) ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการหุบคอนกรีต แต่ใช้ Sodium Thiosulphate Pentahydrate ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) เป็น PCMs โดยใช้คอนกรีตที่มีรูพรุนและมีช่องว่างมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองสรุปได้ว่า ช่องว่างสำหรับการดูดซับที่มีขนาดใหญ่ของคอนกรีตจะรองรับโครงสร้างของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ได้ดี และทำให้โครงสร้างมีเสถียรภาพระหว่างรอบของการให้ความร้อน

Farid and Kong (2001) ได้สร้างแผ่นคอนกรีต 2 แผ่น ในแผ่นแรกจะผสม PCMs โดยใช้ $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ผสมลงในพลาสติกทรงกลมที่ผลิตโดยบริษัท Cristo พลาสติกทรงกลมจะมีช่องว่างด้านในประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ PCMs สามารถขยายตัวได้ในช่วงการหลอมเหลว พลาสติกแข็งที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างทรงกลม จะป้องกันความเค้นที่เป็นอันตรายที่จะเกิดขึ้นรอบๆ โครงสร้าง อย่างไรก็ตาม ความจำเป็นที่จะสร้างความแข็งแรงทางกลของพื้นคอนกรีตด้วยการใส่พลาสติกทรงกลมที่บรรจุ PCMs ลงไปก่อนที่จะหาวิธีปฏิบัติที่เหมาะสม และแผ่นที่สองเป็นแผ่นคอนกรีตเรียบธรรมดา สมรรถนะของแผ่นคอนกรีตทั้งสองแผ่นจะถูกทดสอบและนำมาเปรียบเทียบกัน มวลความร้อนของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนจุดที่ใส่ PCMs แผ่นคอนกรีตที่ผสม PCMs จะเก็บสะสมความร้อนสำหรับทั้งวันจากการให้ความร้อนเพียง 8 ชั่วโมง โดยคอนกรีตแผ่นเรียบจะสูญเสียความร้อนในเวลาไม่กี่ชั่วโมงดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 การเปรียบเทียบสมรรถภาพของระบบให้ความร้อนใต้พื้นห้องโดยใช้และไม่ใช้ PCMs

Xiaoming et al. (2006) ได้ทำการสร้างห้องทดลองขนาด 70 มิลลิเมตร x 70 มิลลิเมตร x 70 มิลลิเมตร โดยด้านข้างของห้องทั้ง 4 ด้านกับด้านล่างของห้องจะเป็นยิปซัมบอร์ดธรรมดา ส่วนด้านบนจะเป็นยิปซัมบอร์ดที่มีส่วนผสมของ PCMs อยู่ ซึ่ง PCMs ที่ใช้คือ RT20 และด้านบนของห้องจะมีดวงไฟขนาด 500 วัตต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานความร้อน ในการทดลอง ได้นำ RT20 มาผสมกับ Montmorillonite ก่อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำความร้อนของ RT20 จากนั้นจึงทำการสร้างห้องจำนวน 3 ห้องคือ ห้องที่ยิปซัมบอร์ดด้านบนเป็นยิปซัมบอร์ดธรรมดา และห้องที่ยิปซัมบอร์ดด้านบนมีส่วนผสมของ RT20/Montmorillonite 20 เปอร์เซ็นต์ กับ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่าอุณหภูมิภายในและภายนอกห้องต่างกันดังนี้

- ห้องยิปซัมบอร์ดธรรมดามีอุณหภูมิต่างกัน 10.5 องศาเซลเซียส
- ห้องยิปซัมบอร์ดที่มีส่วนผสมของ RT20 / Montmorillonite 20 เปอร์เซ็นต์ มีอุณหภูมิต่างกัน 16.5 องศาเซลเซียส
- ห้องยิปซัมบอร์ดที่มีส่วนผสมของ RT20/Montmorillonite 50 เปอร์เซ็นต์ มีอุณหภูมิต่างกัน 20 องศาเซลเซียส

จากผลที่ได้นี้ สรุปว่า ห้องยิปซัมบอร์ดที่มีส่วนผสมของ RT20/Montmorillonite 50 เปอร์เซ็นต์ สามารถรักษาอุณหภูมิที่กำลังสบายของมนุษย์ (Human Comfort) ได้ดีที่สุดแต่ต้องใช้ RT20 / Montmorillonite เพิ่มถึง 30 เปอร์เซ็นต์ จึงจะมีอุณหภูมิต่างกับห้องยิปซัมบอร์ดที่มีส่วนผสมของ RT20 / Montmorillonite 20 เปอร์เซ็นต์ 3.5 องศาเซลเซียส

อุปกรณ์และวิธีการ

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการผลิต Phase Change Materials หรือ PCMs ด้วยวิธี Vacuum Impregnation ซึ่งเป็นวิธีการดูดซับ PCMs เข้าสู่รูพรุนของวัสดุที่มีรูพรุน โดยการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs และการทดสอบประสิทธิภาพของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs

ส่วนที่ 1 การผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs

1. การศึกษาหาปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิวของถ่านลอย

การหาปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิวของถ่านลอยทำการทดสอบเครื่อง Nitrogen Adsorption รุ่น Autosorb1

วัสดุประสงค์

เพื่อศึกษาหาปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิวของถ่านลอยที่เหมาะสมต่อการนำมาผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs

สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

1. ถ่านลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะและโรงงานไฟฟ้า BLCP
2. ไนโตรเจน
3. เครื่อง Nitrogen Adsorption รุ่น Autosorb1

วิธีการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักกระเปาะ จากนั้นใส่สารที่ต้องการวิเคราะห์ในปริมาณ 1/4 ของหลอด แล้วนำไปชั่งเพื่อบันทึกน้ำหนักก่อนทำการวิเคราะห์
2. เปิดก๊าซฮีเลียมและก๊าซไนโตรเจนที่ 10 psi ทั้ง 2 ถึง
3. เข้าโปรแกรม AS1

4. ใส่กระเปาะสารที่ต้องการวิเคราะห์ที่ station 1 หรือ 2
5. สวมเครื่องทำความร้อน Heater ตั้งอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส
6. เข้าโปรแกรม Operation เลือก Out gasser ซึ่งใช้ก๊าซไนโตรเจนเพื่อทำการดูดความชื้นออกจากสารตัวอย่าง
7. ทำการวิเคราะห์โดยการเข้าสู่โปรแกรม โดยเลือก Analysis เลือก Physisorption
8. โหลด User file ทำการเปลี่ยน ID และ Operator
9. เริ่มการวิเคราะห์ เมื่อเครื่องทำการวิเคราะห์เสร็จให้นำกระเปาะที่บรรจุสารที่ทำ การวิเคราะห์ไปชั่งน้ำหนัก
10. เลือก Edit Analysis ใส่น้ำหนักที่บันทึกได้
11. เครื่องจะทำการคำนวณให้โดยอัตโนมัติ เมื่อทราบค่าน้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้ใน การวิเคราะห์



ภาพที่ 14 เครื่อง Nitrogen Adsorption รุ่น Autosorb1

2. การผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs

แสดงขั้นตอนการผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs โดยใช้พาราฟินเป็นวัสดุ PCMs

วัตถุดิบ

เพื่อทำการผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ด้วยวิธี Vacuum Impregnation ขึ้นมาใช้งาน

อุปกรณ์ที่ใช้

1. Vacuum Pump
2. Vacuum Meter
3. Vacuum Flask ขนาด 500 ml
4. Valve
5. Water Bath
6. เครื่องให้ความร้อน (Heater)
7. เทอร์โมมิเตอร์

สารเคมีที่ใช้

1. พาราฟิน
2. เถ้าลอย (Flyash)

วิธีการทดลอง

1. ละลายพาราฟินด้วย Water Bath เพื่อควบคุมอุณหภูมิของพาราฟิน
2. นำเถ้าลอยซึ่งถูกขึ้นรูปเป็นเม็ดใส่ลงไปใน Vacuum Flask
3. ต่อ Vacuum Pump เข้ากับ Vacuum Flask และนำ Vacuum Flask แช่ใน Water Bath
4. ทำการเปิด Pump เพื่อกำจัดอากาศภายใน Flask และภายในรูพรุนของเถ้าลอย

5. หลังจากนั้นทำการเทพาราฟินหลอมเหลวลงไปใน Flask และทำการปิด Pump เพื่อให้ถั่วลอยทำการดูดซับพาราฟิน จะได้ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs

6. กรอง Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ออก นำผ้ามาเช็ด ทิ้งให้เย็นแล้วจึงนำไปบดให้มีลักษณะเป็นผง

7. นำ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ที่ผลิตได้ไปตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง

- Differential Scanning Calorimetry (DSC)
- Scanning Electron Microscope (SEM)



ภาพที่ 15 ชุดอุปกรณ์

การผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ด้วยวิธี Vacuum Impregnation มีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลกระทบต่อค่า Latent heat ของวัสดุ PCMs คือ ความดันสุญญากาศ เวลาในการแช่ถั่วลอยและอุณหภูมิของพาราฟิน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs จึงสรุปสภาวะที่จะใช้ทดลองดังแสดงในตารางที่ 6



ภาพที่ 16 เถ้าลอยก่อนและหลังขึ้นรูป

ตารางที่ 6 สภาวะที่ใช้ทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs

การทดลองที่	เวลาสุญญากาศ (นาท)	ความดัน สุญญากาศ (inHg)	เวลาในการแช่ เถ้าลอย (นาท)	อุณหภูมิพาราฟิน (°C)
1	30	0	30	90
	30	10	30	90
	30	20	30	90
	30	30	30	90
	30	40	30	90
	30	50	30	90
2	30	30	5	90
	30	30	15	90
	30	30	30	90
	30	30	60	90
3	30	30	30	65
	30	30	30	90
	30	30	30	120

3. การศึกษาหาค่าคุณสมบัติทางความร้อน

การหาค่าความจุความร้อนจำเพาะ Heat capacity (C_p) และ ค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลว หรือ Latent heat of fusion (λ) ของพาราฟินและ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs โดยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)

วัตถุประสงค์

เพื่อหาค่าความจุความร้อนจำเพาะ Heat capacity (C_p) และ ค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลว หรือ Latent heat of fusion (λ) ของพาราฟินและ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs

สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

1. พาราฟินและ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs
2. ถ้วยอลูมินาบรรจุสารทดสอบ 2 ถ้วย
3. ชุดทดสอบ DSC-TGA ยี่ห้อ TA INSTRUMENT รุ่น SDT 2860 ประกอบด้วย เครื่อง DSC-TGA ดังภาพที่ 17

- คอมพิวเตอร์
- ปืน
- แก๊สไนโตรเจน
- Stabilizer

วิธีการทดลอง

1. เปิดปืนและเตรนน้ำที่ค้างอยู่ในปืนออกเป็นเวลานานประมาณ 5 นาที
2. เปิดวาล์วแก๊สไนโตรเจนและปรับอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเป็น 100 ลิตรต่อนาที
3. เปิดสวิตช์เครื่อง Stabilizer , เครื่อง DSC และคอมพิวเตอร์
4. เลือกโปรแกรม TA instrument → Wizard → DSC-TGA
5. บรรจุชิ้นงานตัวอย่างลงในถ้วยอลูมินาประมาณครึ่งหนึ่งของความจุของถ้วย

6. เลือกให้อัตราการการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating Rate) กับสารทดสอบ 1 องศาเซลเซียสต่อ นาที และอุณหภูมิสุดท้ายที่ทำการทดสอบที่ 90 องศาเซลเซียส
7. นำตัวอย่างอุณหภูมิของชิ้นงานตัวอย่างและตัวอย่างอุณหภูมิอ้างอิงบรรจุใน DSC Apparatus และเลือกเริ่มการทดลอง (Start Run) ในเครื่องคอมพิวเตอร์
8. เลือก TA Universal เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ



ภาพที่ 17 ชุดทดสอบ DSC-TGA ยี่ห้อ TA INSTRUMENT รุ่น SDT 2860

4. การศึกษาหาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

การทดสอบนี้จะทำการถ่ายภาพโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ PHILIPS รุ่น XL30

วัตถุประสงค์

เพื่อคุณลักษณะทางกายภาพของแก้วลอยและ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ในระดับไมโครสเกล และเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแต่ละวัสดุ

สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

1. แก้วลอยและ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs
2. เครื่อง SEM ยี่ห้อ PHILIBS รุ่น XL30

วิธีการทดสอบ

1. เปิดวาล์วก๊าซในโตรเจน และเปิดเครื่อง SEM
2. นำชิ้นงานตัวอย่างไปทำการโถงเพื่อให้อนุภาคอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น
3. นำชิ้นงานมาใส่ในเครื่อง SEM
4. ถ่ายภาพ SEM ที่ขนาดต่างๆ และบันทึกภาพ



ภาพที่ 18 เครื่อง SEM ยี่ห้อ PHILIBS รุ่น XL30

ส่วนที่ 2 การทดสอบประสิทธิภาพของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs

5. ทดสอบประสิทธิภาพด้านการกักความร้อน

การทดสอบนี้ได้นำ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs มาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการกักความร้อน

วัตถุประสงค์

ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs มาใช้ในวัสดุก่อสร้าง เพื่อพัฒนาวัสดุก่อสร้างให้เกิดนวัตกรรมใหม่ในการกักความร้อน

อุปกรณ์ที่ใช้

1. เทอร์โมคัปเปอ์
2. เทอร์โมมิเตอร์
3. หลอดไฟ
4. ขาดังและตัวหนีบ

สารเคมีที่ใช้

1. Paraffin / Fly Ash Composite PCMs
2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1
3. ทราย
4. น้ำ

วิธีการทดสอบ

1. นำมอร์ตาร์ที่ได้จากการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทรายและน้ำมาสร้างห้องจำลองขนาด 150 x 150 x 150 มิลลิเมตร แต่ละด้านหนา 2 เซนติเมตร โดยให้ด้านบนของห้องจำลองเปิดโล่ง

2. นำ PCMs ที่ผลิตได้มาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราชและน้ำที่อัตราส่วนต่างๆ ดังตาราง 7 เพื่อทำการผลิตมอร์ตาร์และมอร์ตาร์ PCMs
3. นำมอร์ตาร์มาหล่อเป็นสี่เหลี่ยมจตุรัสขนาด 150 x 150 x 20 มิลลิเมตรและ 150 x 150 x 10 มิลลิเมตรจากนั้นจึงทิ้งให้แข็งตัว ดังภาพที่ 19
4. นำมอร์ตาร์ PCMs มาหล่อทับบนมอร์ตาร์เพลทขนาด 150 x 150 x 10 มิลลิเมตร โดยให้มอร์ตาร์ PCMs มีขนาดเท่ากันกับมอร์ตาร์เพลท จากนั้นจึงทิ้งให้แข็งตัว ดังภาพที่ 20
5. นำมอร์ตาร์เพลทและมอร์ตาร์ PCMs เพลท มาไว้ด้านบนของห้องจำลองเพื่อปิดด้านบนของห้องจำลอง
6. นำหลอดไฟไว้ด้านบนของห้องจำลองดังภาพที่ 21 เปิดไฟ ทำการตรวจวัดอุณหภูมิที่ผิวและอุณหภูมิภายในห้อง บันทึกค่าทุกๆ 1 นาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
7. หลังจากนั้นทำการปิดไฟ ตรวจวัดอุณหภูมิที่ผิวและอุณหภูมิภายในห้อง บันทึกค่าทุกๆ 1 นาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 7 แสดงอัตราส่วนผสมระหว่าง PCMs: ปูนซีเมนต์: ทราช: น้ำ

อัตราส่วนผสมที่	วัสดุ (กรัม)			
	PCMs	ปูนซีเมนต์	ทราช	น้ำ
1	0	300	115	115
2	30	270	115	115
3	90	210	115	115
4	150	150	115	115



ภาพที่ 19 มอร์ตาร์เพลาหนา 20 และ 10 มิลลิเมตร



ภาพที่ 20 มอร์ตาร์ PCMs เพลาหนา 20 มิลลิเมตร



ภาพที่ 21 ภาพการจัดอุปกรณ์เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs

6. ทดสอบประสิทธิภาพด้านความแข็งแรง

การทดสอบนี้ได้นำตัวอย่างจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ โรงงานไฟฟ้า BLCP และ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs มาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพด้านความแข็งแรง

วัตถุประสงค์

ศึกษาถึงผลกระทบของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ที่มีต่อความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

อุปกรณ์ที่ใช้

1. เครื่องผสม
2. เครื่องทดสอบแรงอัด
3. เกรียง

4. แท่งกระทุ้ง
5. แม่แบบลูกบาศก์ (Mold) ขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร

สารเคมีที่ใช้

1. Paraffin / Fly Ash Composite PCMs
2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1
3. แก้วลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะและโรงงานไฟฟ้า BLCP
4. ทราย
5. น้ำ
6. น้ำมันหล่อลื่น

วิธีการทดสอบ

1. นำวัสดุทดแทน คือ แก้วลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะและโรงงานไฟฟ้า BLCP และ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs มาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 8 จากนั้นจึงนำมาผสมทรายและน้ำ โดยให้อัตราส่วนระหว่างวัสดุผสมต่อทรายเป็น 1 : 2.75 โดยน้ำหนักและปริมาตรน้ำที่ใช้ต้องเพียงพอที่จะทำให้ค่าการไหลแผ่ของซีเมนต์เฟลทเป็น 105 – 115
2. นำซีเมนต์เฟลทธรรมดาและซีเมนต์เฟลท PCMs ที่ได้มาหล่อเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด 50 mm. x 50 mm. x 50 mm.
3. ทิ้งให้แข็งตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงแกะออกจากแบบและนำไปบ่มน้ำเป็นเวลา 1, 3, 7, 28 วัน
4. นำลูกบาศก์ที่ครบกำหนดการบ่มน้ำมาเช็ดให้แห้ง วัดขนาดของลูกบาศก์และทำการทดสอบแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบแรงอัด



ภาพที่ 22 เครื่องทดสอบแรงอัด



ภาพที่ 23 แม่แบบลูกบาศก์ (Mold) ขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร



ภาพที่ 24 เครื่องผสม



ภาพที่ 25 เกรียงและแท่งกระทุ้ง

ตารางที่ 8 อัตราส่วนระหว่าง PCMs: ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์: ทราช: น้ำ

อัตราส่วน (ปูน : วัสดุทดแทน)	วัสดุ (g)					
	ปูนซีเมนต์	แม่เมาะ	BLCP	PCMs	ทราช	น้ำ
100 : 0	1,050	-	-	-	2,887.5	832
	945	105	-	-	2,887.5	808
90 : 10	945	-	105	-	2,887.5	888
	945	-	-	105	2,887.5	856
	840	210	-	-	2,887.5	
80 : 20	840	-	210	-	2,887.5	900
	840	-	-	210	2,887.5	928
	735	315	-	-	2,887.5	768
70 : 30	735	-	315	-	2,887.5	957
	735	-	-	315	2,887.5	1,090
	630	420	-	-	2,887.5	
60 : 40	630	-	420	-	2,887.5	1,010
	630	-	-	420	2,887.5	1,152
	525	525	-	-	2,887.5	728
50 : 50	525	-	525	-	2,887.5	1,000
	525	-	-	525	2,887.5	1,360

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งงานวิจัยเป็น 2 ส่วน คือ การผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs และการทดสอบประสิทธิภาพของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs โดยการทดลองที่ 1 – 4 เป็นการทดลองในส่วนที่ 1 และการทดลองที่ 5 – 6 เป็นการทดลองในส่วนที่ 2

การทดลองที่ 1 เป็นการเลือกแหล่งผลิตของถ่านล้อยที่จะนำมาใช้ในการผลิตวัสดุ PCMs ซึ่งถ่านล้อยที่ใช้ในการการพิจารณาได้มาจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะและโรงงานไฟฟ้า BLCP หลังจากที่ได้เลือกแหล่งผลิตถ่านล้อยได้แล้วจึงนำถ่านล้อยจากแหล่งที่เลือกมาทำการผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ซึ่งเป็นการทดลองที่ 2 Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ที่ผลิตได้จะได้รับการตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อนและคุณสมบัติทางกายภาพ ซึ่งเป็นการทดลองที่ 3 และ 4

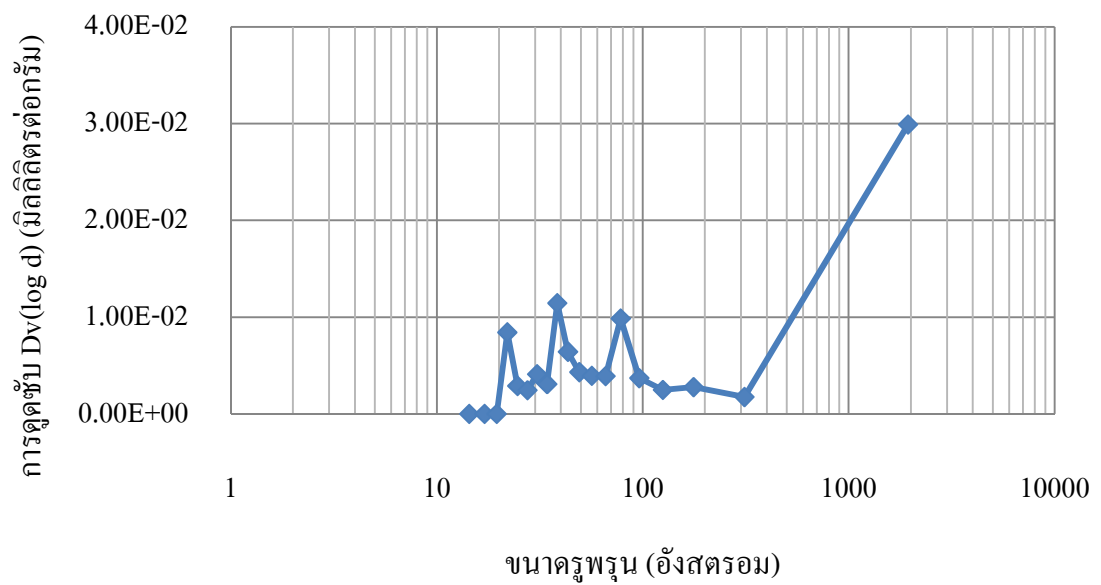
การทดลองในส่วนที่ 2 เป็นการนำวัสดุ PCMs มาใช้งานเพื่อทดสอบประสิทธิภาพและพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุ PCMs ร่วมกับวัสดุก่อสร้าง โดยการทดลองได้นำ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs มาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์และทำการทดสอบประสิทธิภาพด้านการกันความร้อนกับด้านความแข็งแรง ซึ่งตรงกับทดลองที่ 5 และ 6

1. การศึกษาหาปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิวของถ่านล้อย

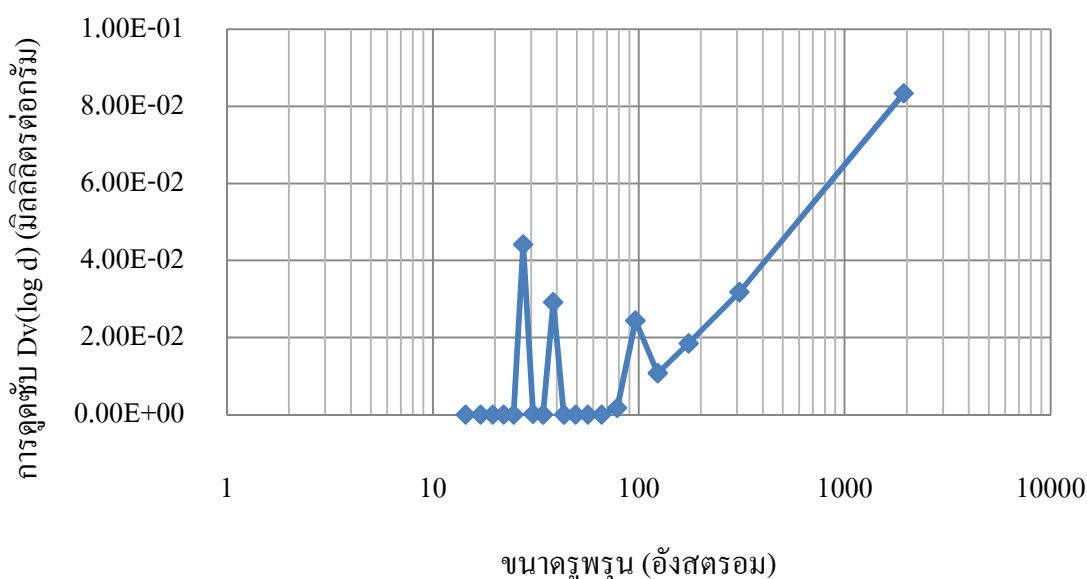
แหล่งผลิตถ่านล้อยแต่ละแหล่งมีความสำคัญต่อการผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs เพราะแต่ละแหล่งมีวัตถุดิบและสภาวะในการเผาต่างกัน ทำให้ถ่านล้อยจากแต่ละแหล่งมีความแตกต่างกัน ซึ่งถ่านล้อยที่เหมาะสมต่อการนำมาผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs จะต้องมีความรูพรุนที่มากพอที่จะจะสามารถดูดซับพาราฟินได้มาก โดยในการทดลองได้ทำการตรวจสอบหาปริมาณรูพรุนของถ่านล้อยจาก 2 แหล่งคือ โรงงานไฟฟ้าแม่เมาะและโรงงานไฟฟ้า BLCP ด้วยเครื่อง Nitrogen Adsorption รุ่น Autosorb1 ด้วยเทคนิคการดูดซับไนโตรเจนแบบ BJH ได้ผลการตรวจสอบดังตารางที่ 9 และภาพที่ 26-27

ตารางที่ 9 พื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุนและปริมาตรรูพรุนของถ้ำลอย

ถ้ำลอย	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (อังสตรอม)	ปริมาตร (มิลลิลิตรต่อกรัม)
แม่เมาะ	4.411	21.98	0.033
BLCP	9.313	27.44	0.097



ภาพที่ 26 การกระจายขนาดรูพรุนของถ้ำลอยจากแม่เมาะ



ภาพที่ 27 การกระจายขนาดอนุภาคของถ่านลอกจาก BLCP

จากตารางที่ 9 และภาพที่ 26-27 แสดงให้เห็นว่าถ่านลอกจากโรงงานไฟฟ้า BLCP มีพื้นที่ผิว ขนาดและปริมาตรของรูพรุนมากกว่าถ่านลอกจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ ทั้งนี้เป็นเพราะถ่านลอกจาก โรงงานไฟฟ้าแม่เมาะใช้ความร้อนในการเผาถ่านหินที่อุณหภูมิ 1100-1400 องศาเซลเซียสซึ่งถือว่าเป็นอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง ทำให้ถ่านลอกจากที่ได้เกิดการหลอมละลายและปิดรูพรุนของตัวเอง ในขณะที่ถ่านลอกจากโรงงานไฟฟ้า BLCP ใช้ความร้อนในการเผาถ่านหินที่อุณหภูมิไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส ซึ่งความร้อนที่ใช้ยังไม่ร้อนเพียงพอที่จะทำให้ถ่านลอกจากละลายมาปิดรูพรุนของตัวเอง ถ่านลอกจากโรงงานไฟฟ้า BLCP จึงมีพื้นที่ผิว ขนาดและปริมาตรของรูพรุนมากกว่าถ่านลอกจาก โรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ

2. การผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs

วิธีผลิต PCMs ด้วยวิธี Vacuum Impregnation คือวิธีการดูดซับพาราฟินเข้าสู่รูพรุนของวัสดุ รูพรุนโดยอาศัยแรงดันอากาศในการช่วยผลักดัน เนื่องจากค่าความร้อนแฝงของ PCMs ขึ้นอยู่กับ ปริมาณของพาราฟินที่วัสดุรูพรุนดูดซับได้ ดังนั้นปริมาณของวัสดุรูพรุนที่ใช้ในการดูดซับจึงมี ความสำคัญมาก เพราะจะทำให้การดูดซับเกิดได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามภายในรูพรุนของวัสดุรูพรุนมี อากาศอยู่ซึ่งอากาศภายในรูพรุนจะเป็นตัวต่อต้านการดูดซับของตัววัสดุเอง จึงทำให้การดูดซับ พาราฟินซึ่งเป็นของเหลวหนืดเกิดขึ้นได้ยาก การกำจัดอากาศภายในรูพรุนออกก่อนที่จะทำการดูด ซซับพาราฟินจึงมีความสำคัญ

Vacuum Pump ในชุดการทดลองถูกติดตั้งเพื่อทำการกำจัดอากาศภายใน Vacuum Flask และภายในรูพรุนของแก้วลอย โดยมี Vacuum Meter และ Valve เป็นตัวควบคุมความดันสุญญากาศ

แก้วลอยต้องถูกขึ้นรูปเป็นเม็ดก่อนเพื่อความสะดวกในการทดลอง เนื่องจากแก้วลอยมีลักษณะเป็นผงที่มีขนาดอนุภาคในระดับไมโครซึ่งยากต่อการกรองออกจากพาราฟินหลอมเหลว การขึ้นรูปเป็นเม็ดของแก้วลอยทำได้โดยการนำแก้วลอยมาผสมน้ำเพียงเล็กน้อยให้เพียงพอที่จะทำให้แก้วลอยเกิดการคงตัว จากนั้นนำแก้วลอยเปียกใส่ในหลอดฉีดยาตัดปลายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ทำการอัดเพื่อไล่น้ำออกจะได้แก้วลอยที่อัดตัวเป็นแท่ง ใช้มีดแบ่งออกเป็นส่วนๆ แล้วนำไปอบให้แห้งจึงจะสามารถนำมาใช้งานได้

แก้วลอยเม็ดที่ถูกแช่ในพาราฟินเพื่อผลิตเป็น Paraffin / Fly Ash Composite PCMs หลังจากที่ถูกกรองแยกออกจากพาราฟินและทำให้แห้งแล้วจะต้องถูกนำไปบดให้เป็นผง เพื่อความสะดวกในการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและการใช้งานร่วมกับปูนซีเมนต์ ภาพที่ 28 แสดงแก้วลอยเม็ดก่อนและหลังการแช่พาราฟินกับแก้วลอยหลังแช่พาราฟินที่ผ่านการบดแล้ว

การผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ด้วยวิธี Vacuum Impregnation มีตัวแปรสำคัญ 3 ตัวที่มีผลต่อค่า Latent heat ของวัสดุ PCMs คือ ความดันสุญญากาศ เวลาการแช่แก้วลอยในพาราฟินและอุณหภูมิของพาราฟิน ซึ่งจะได้รับการตรวจสอบด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ในการทดลองที่ 3



ก. ถ้ำลอยเมืดก่อนแ่พราฟีน



ข.ถ้ำลอยเมืดหลังแ่พราฟีน



ค. ถ้ำลอยหลังแ่พราฟีนที่ผ่านการบด

ภาพที่ 28 ถ้ำลอยเมืดก่อนและหลังการแ่พราฟีนกับถ้ำลอยหลังแ่พราฟีนที่ผ่านการบด

3. การศีกษาหาค่าคุณสมบัติทางความร้อน

การศีกษาหาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่า Latent Heat ของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ด้วยวิธี Vacuum Impregnation ได้ทำการศีกษาตามตารางที่ 6 โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 การทดลอง ทุกการทดลองได้รับการตรวจสอบค่า Latent Heat ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry หรือ DSC

Differential Scanning Calorimetry หรือ DSC เป็นเทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน โดยใช้วิธีการพิจารณา Heat flow ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงของสารที่ทดสอบ เครื่อง DSC เป็นเครื่องมือที่ใช้ช่วยในการตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อนทั้งในเชิงฟิสิกส์และเคมีของสารที่ไม่ทราบส่วนประกอบ หรือสารที่ไม่ทราบลักษณะการเปลี่ยนสถานะ การทดสอบโดยใช้เครื่อง DSC

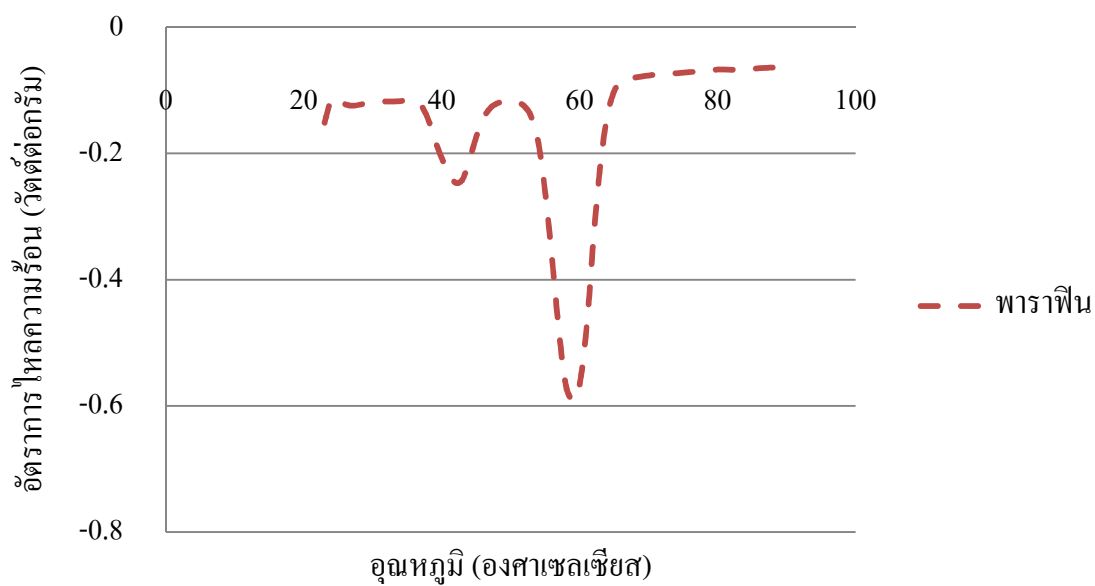
จะสามารถให้ทั้งค่าเชิงปริมาณและคุณภาพ โดยผลการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อและวิเคราะห์แยกจากกัน เพื่อความง่ายในการทำความเข้าใจ มีรายละเอียดดังนี้

3.1 ผลกระทบของความดันสุญญากาศ

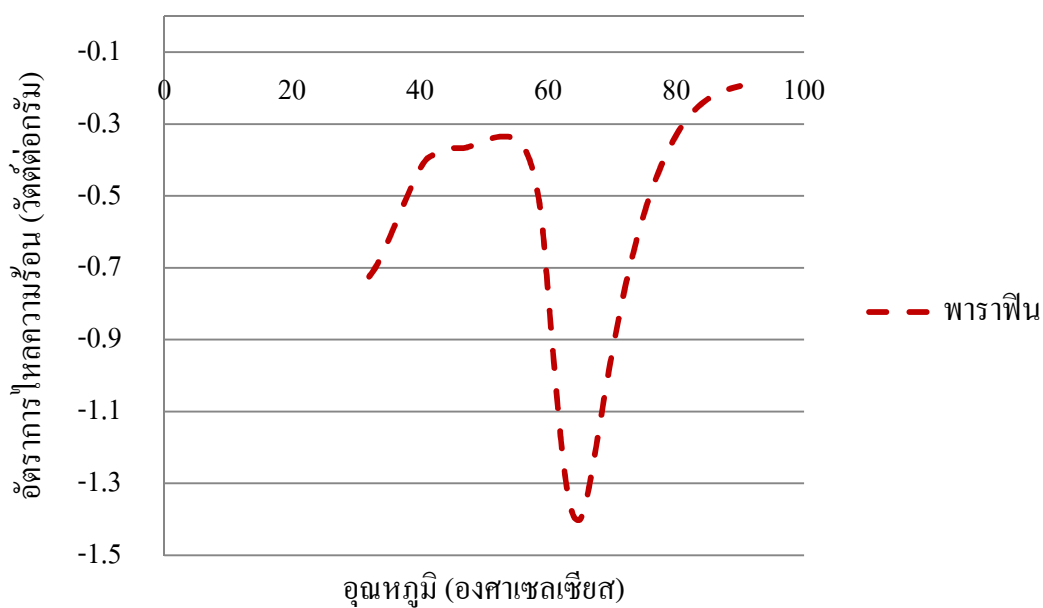
ผลการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะ Heat Capacity (C_p) จุดหลอมเหลวและค่าความร้อนแฝงหรือ Latent Heat of Fusion (λ) ของสารตั้งต้นซึ่งได้แก่พาราฟิน โดยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ยี่ห้อ TA INSTRUMENT รุ่น SDT 2860 แสดงดังตารางที่ 10 และภาพที่ 29

ตารางที่ 10 คุณสมบัติทางความร้อนของพาราฟิน

พาราฟินที่ Heating rate	1 องศาเซลเซียสต่อนาที	5 องศาเซลเซียสต่อนาที
ความจุความร้อนของแข็ง (จุดต่อกรัมองศาเซลเซียส)	7.087	4.530
ความจุความร้อนของเหลว (จุดต่อกรัมองศาเซลเซียส)	4.626	2.967
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	58.95	64.74
ความร้อนแฝง (จุดต่อกรัม)	184.1	159.6



ก. กราฟ DSC ของพาราฟินที่ Heating rate 1 องศาเซลเซียสต่อนาที



ข. กราฟ DSC ของพาราฟินที่ Heating rate 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

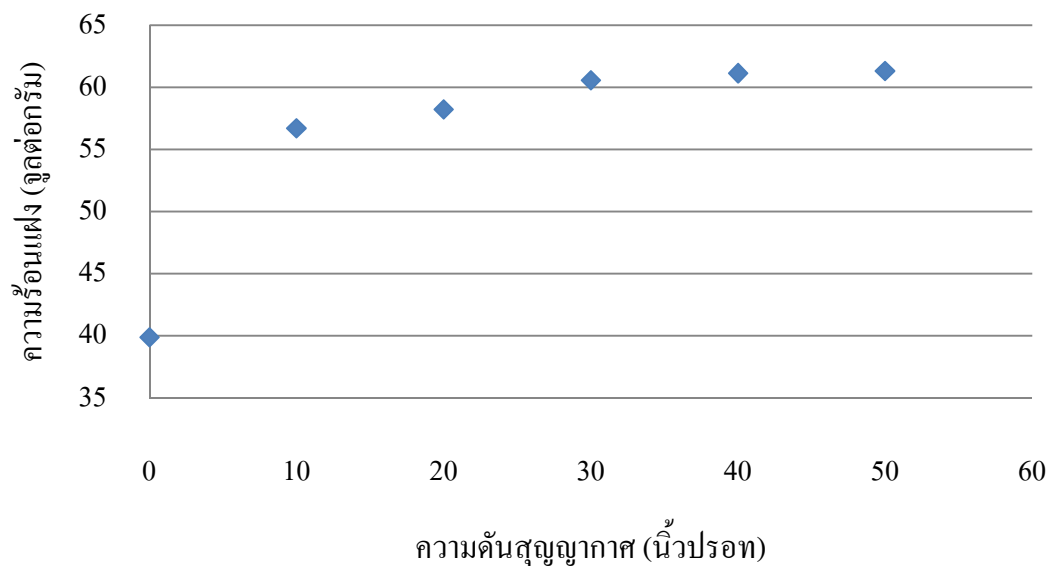
ภาพที่ 29 กราฟ DSC ของพาราฟิน

การตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อนของพาราฟินทำเพื่อนำคุณสมบัติทางความร้อนที่ตรวจสอบได้มาเป็นมาตรฐานอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ที่ผลิตได้ในสถานะต่างๆ จากตารางที่ 10 และภาพที่ 29 พาราฟินที่ Heating rate 1 องศาเซลเซียสต่อนาทิจ มีจุดหลอมเหลว 58.95 องศาเซลเซียส และมีค่าความร้อนแฝง 184.1 จูลต่อกรัม ในขณะที่พาราฟินที่ Heating rate 5 องศาเซลเซียสต่อนาทิจ มีจุดหลอมเหลว 64.74 องศาเซลเซียส และมีค่าความร้อนแฝง 159.6 จูลต่อกรัม ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่ได้มีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก ทั้งนี้การหาคุณสมบัติทางความร้อนของสารที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ (ต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส) ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ยี่ห้อ TA INSTRUMENT รุ่น SDT 2860 เหมาะที่จะใช้กับ Heating rate ที่ต่ำ เพราะการเพิ่มความร้อนที่เร็วเกินไปจะทำให้คุณสมบัติทางความร้อนที่ได้มีค่ากว้างไม่ละเอียดเพียงพอที่จะทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของสารที่ทำการทดลองได้และกราฟ DSC ของพาราฟินที่ Heating rate สูงก็ไม่สามารถแสดง base line ได้อย่างชัดเจน ดังนั้นการตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อนของงานวิจัยจึงใช้ Heating rate ที่ 1 องศาเซลเซียสต่อนาทิจ

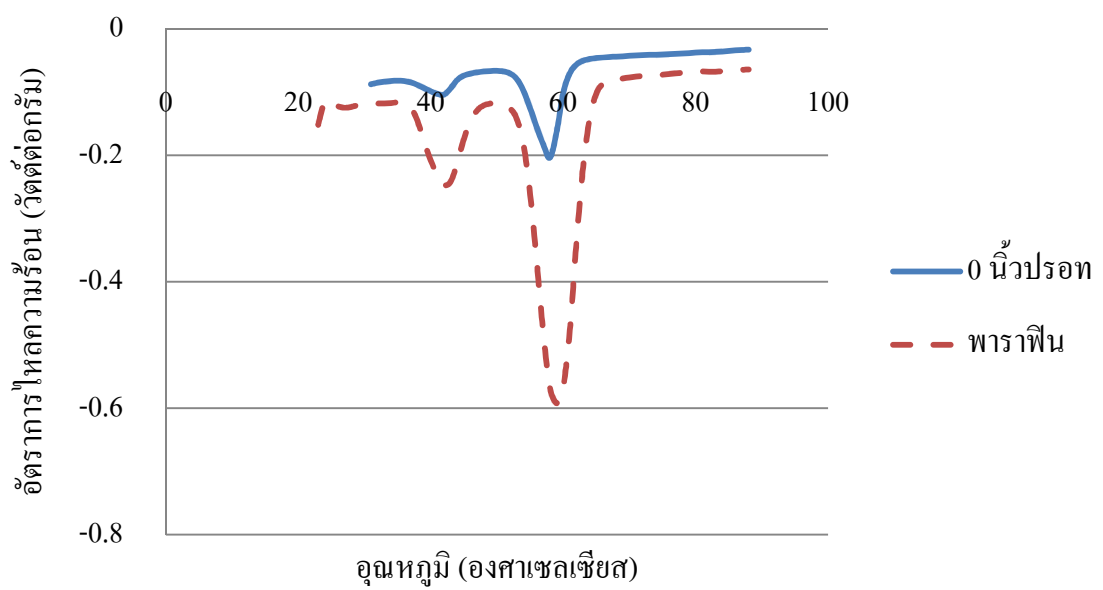
สำหรับการศึกษาผลกระทบของความดันสุญญากาศจะศึกษาถึงลักษณะการหลอมละลายของสารตัวอย่าง จุดหลอมเหลวและปริมาณของความร้อนแฝงเป็นหลัก ซึ่งความดันสุญญากาศและสถานะต่างๆที่ใช้ในการทดลอง ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของแต่ละตัวอย่างและกราฟ DSC ของแต่ละตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 11 และภาพที่ 31-37 ตามลำดับ

ตารางที่ 11 ความดันสุญญากาศและสถานะต่างๆที่ใช้ในการทดลองและคุณสมบัติทางความร้อนของสารตัวอย่าง

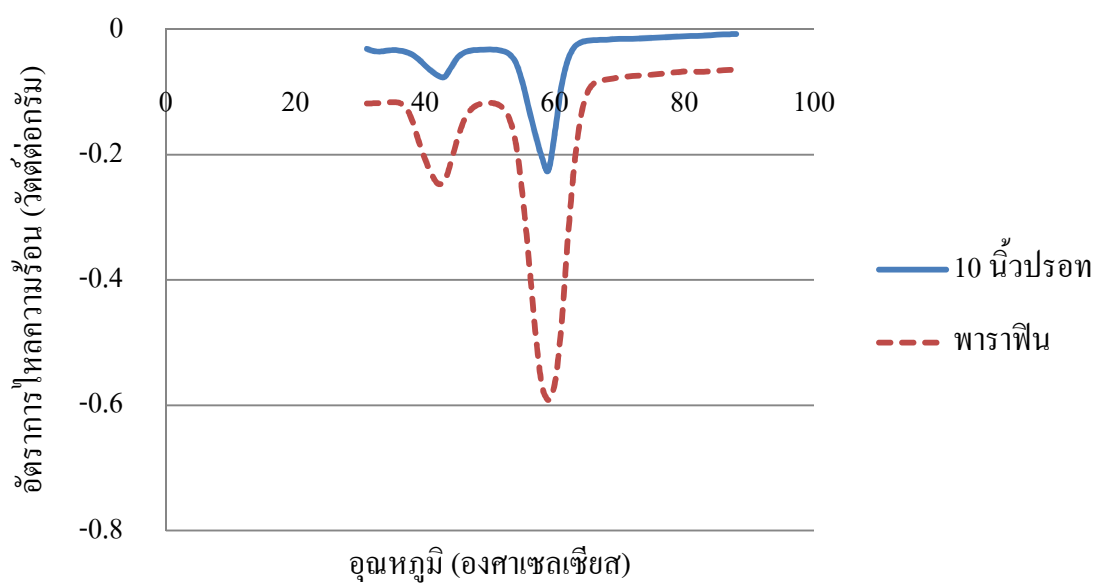
ความดัน สุญญากาศ (นิ้วปรอท)	เวลา สุญญากาศ (นาทิจ)	เวลาการแช่ ถ้ำลอย (นาทิจ)	อุณหภูมิ พาราฟิน (°C)	จุดหลอมเหลว พาราฟิน (°C)	ความร้อน แฝง (จูลต่อกรัม)
0	30	30	90	58.19	39.89
10	30	30	90	58.93	56.70
20	30	30	90	58.96	58.23
30	30	30	90	58.88	60.56
40	30	30	90	58.53	61.12
50	30	30	90	58.65	61.32



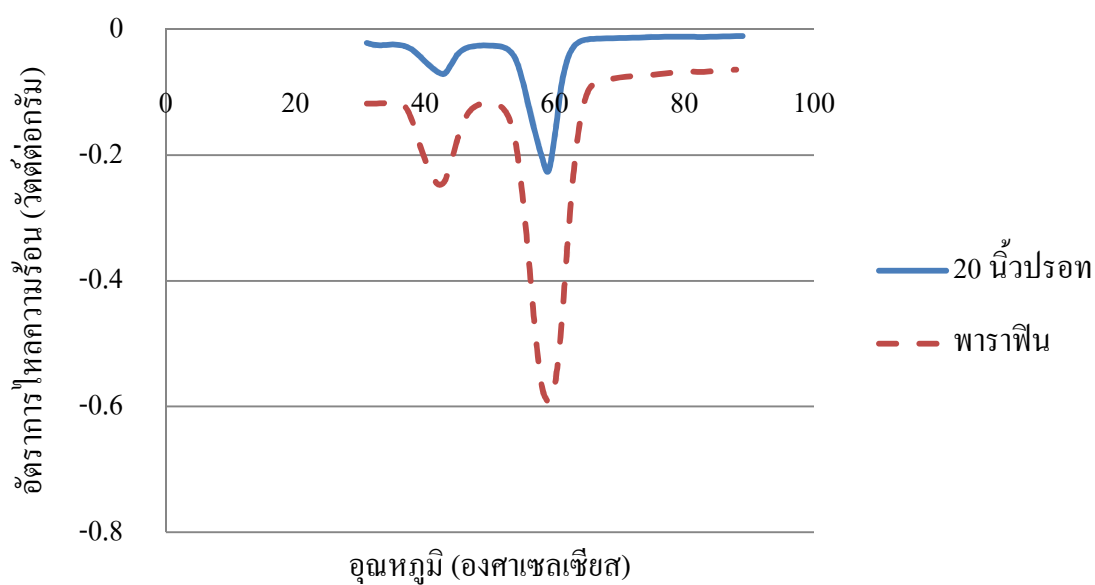
ภาพที่ 30 ผลของความดันสูญญากาศต่อค่าความร้อนแฝง



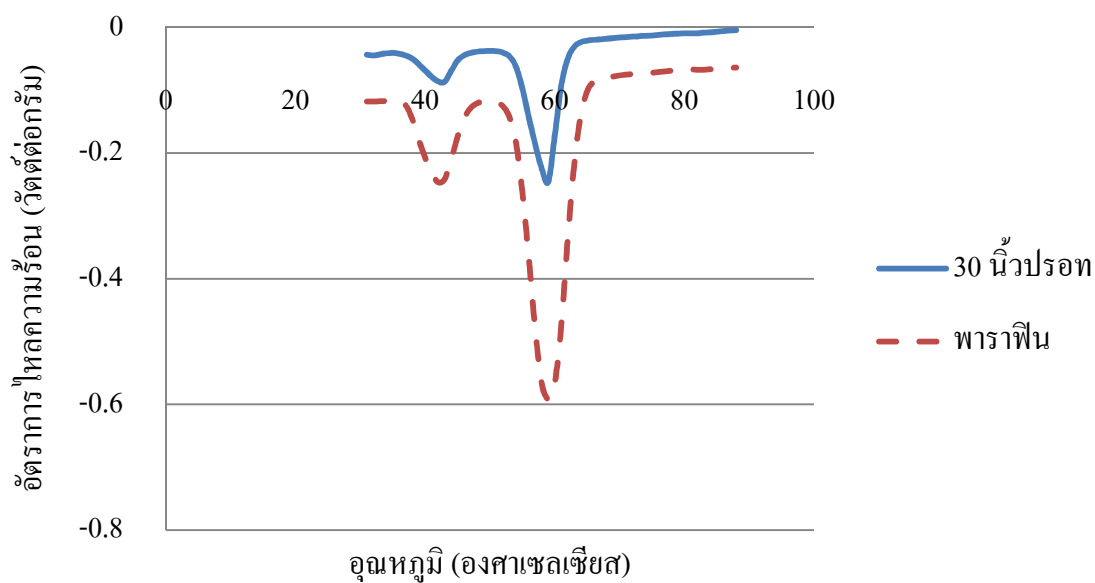
ภาพที่ 31 กราฟ DSC ที่ความดันสูญญากาศ 0 นิ้วปรอท



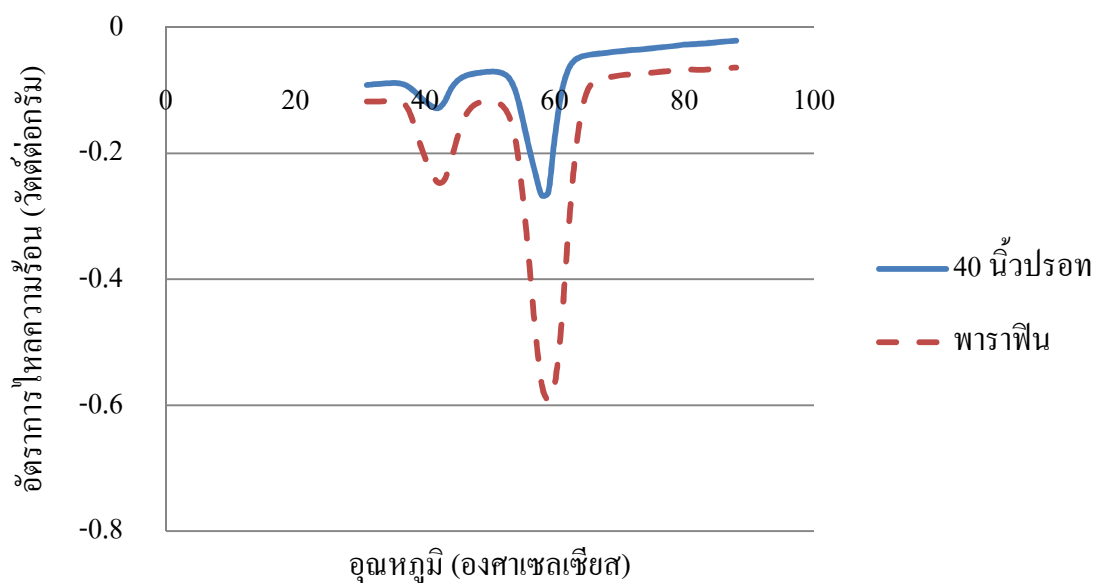
ภาพที่ 32 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 10 นีวปรอท



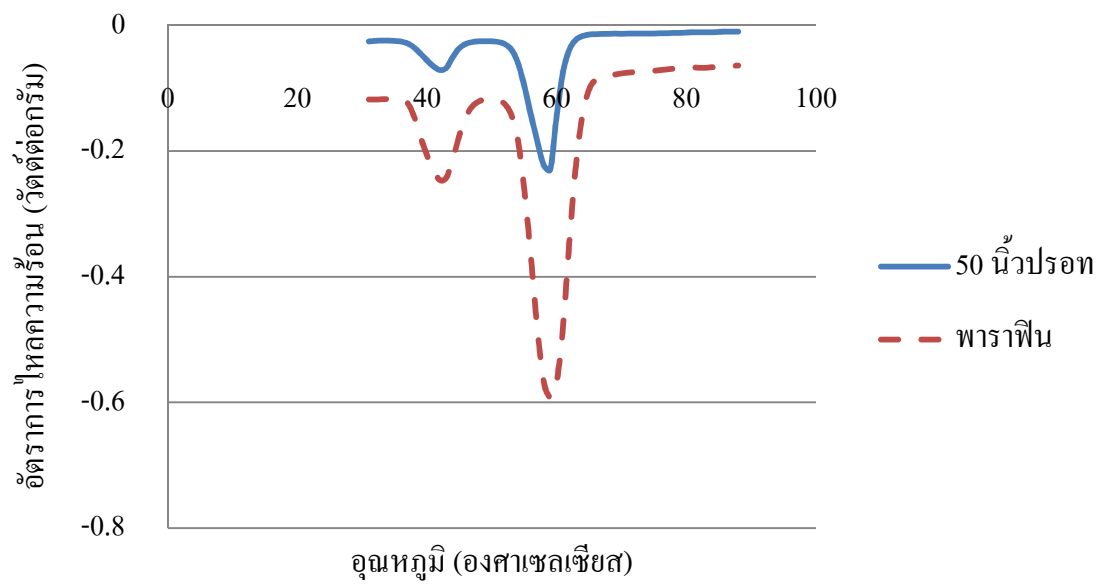
ภาพที่ 33 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 20 นีวปรอท



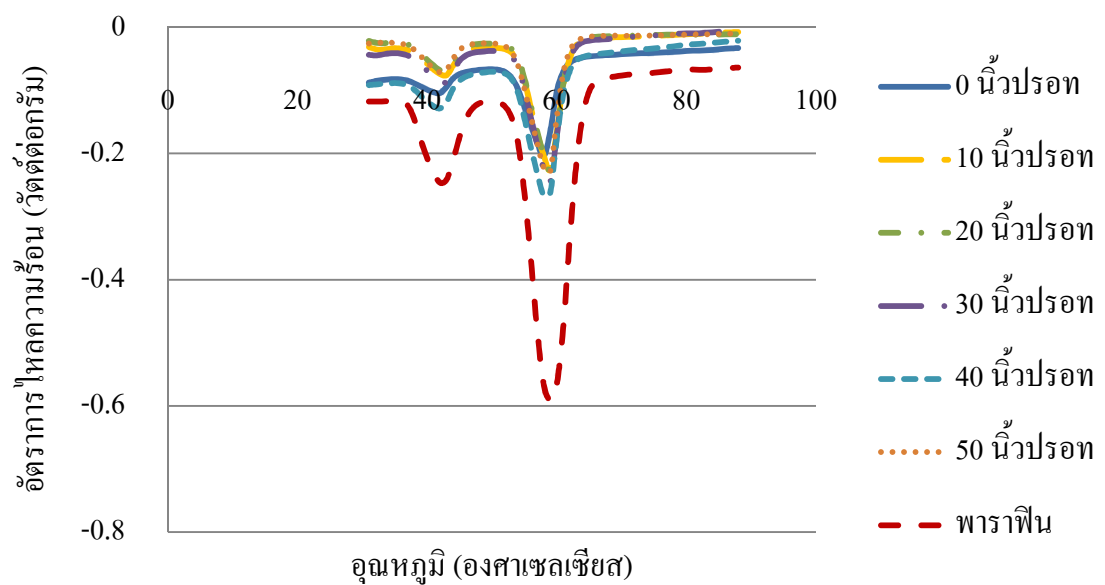
ภาพที่ 34 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 30 นิ้วปรอท



ภาพที่ 35 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 40 นิ้วปรอท



ภาพที่ 36 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 50 นิ้วปรอท



ภาพที่ 37 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศต่างๆ

จากตารางที่ 11 จะเห็นว่าจุดหลอมเหลวของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs จะมีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ที่ประมาณ 58-59 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของพาราฟินมาก นั้นหมายความว่าพาราฟินที่ถูกดูดซับเข้ารูพรุนของเถ้าลอยไม่ได้มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นต่อกัน นอกจากนี้ยังสามารถดูได้จากภาพที่ 31-37 ซึ่งจะเห็นว่ากราฟ DSC ของแต่ละความดันสุญญากาศมีลักษณะคล้ายคลึงกับกราฟ DSC ของพาราฟินมาก ดังนั้นจากจุดหลอมเหลวและจากลักษณะของกราฟ DSC ที่ได้จึงบ่งบอกแน่ชัดว่าการผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น

ผลของความดันสุญญากาศต่อค่าความร้อนแฝงหรือค่า Latent Heat ที่แสดงในตารางที่ 11 และภาพที่ 30 นั้นแสดงให้เห็นว่าที่ 0 นิ้วปรอท หรือการดูดซับแบบธรรมดาจะมีค่าความร้อนแฝงน้อยมากคือ 39.89 จูลต่อกรัม ทั้งนี้เป็นเพราะอากาศที่อยู่ภายในรูพรุนของเถ้าลอยมีปริมาณมากทำให้การดูดซับพาราฟินเกิดขึ้นได้น้อย แต่หลังจากที่ใช้การดูดซับด้วยวิธี Vacuum Impregnation จะเห็นว่าค่าความร้อนแฝงเพิ่มขึ้นอย่างมากคือ 56.70 จูลต่อกรัม และเมื่อเพิ่มความดันสุญญากาศมากขึ้นค่าความร้อนแฝงก็จะเพิ่มมากขึ้นตามความดันสุญญากาศ ทั้งนี้เนื่องจากความดันสุญญากาศที่มากขึ้นจะทำให้สามารถกำจัดอากาศในรูพรุนของเถ้าลอยได้มากขึ้น โดยความร้อนแฝงของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับพาราฟินแสดงดังตารางที่ 12 อย่างไรก็ตามที่ความดันสุญญากาศ 30 และ 40 นิ้วปรอท จะมีค่าความร้อนแฝงแตกต่างกันน้อยมากหรือเกือบจะเท่ากันคือ 60.56 และ 61.12 จูลต่อกรัม ตามลำดับ ดังนั้นความดันสุญญากาศที่เหมาะสมกับการทำ Vacuum Impregnation คือ 30 นิ้วปรอท

ตารางที่ 12 เปอร์เซ็นต์ความร้อนแฝงของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ที่ความดันสุญญากาศต่างๆ เทียบกับพาราฟิน

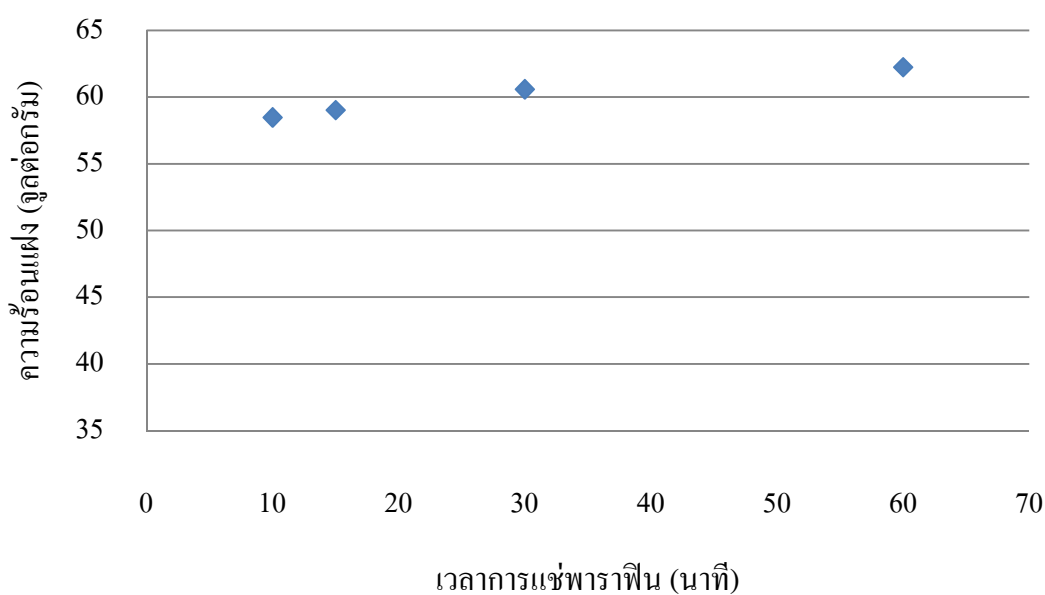
ความดันสุญญากาศ (นิ้วปรอท)	ความร้อนแฝง (จูลต่อกรัม)	$\frac{\text{ความร้อนแฝงคอมโพสิต}}{\text{ความร้อนแฝงพาราฟิน}} \times 100$
0	39.89	21.67 %
10	56.70	30.80 %
20	58.23	31.63 %
30	60.56	32.90 %
40	61.12	33.20 %
50	61.32	33.31 %

3.2 ผลกระทบของเวลาในการแช่พาราฟิน

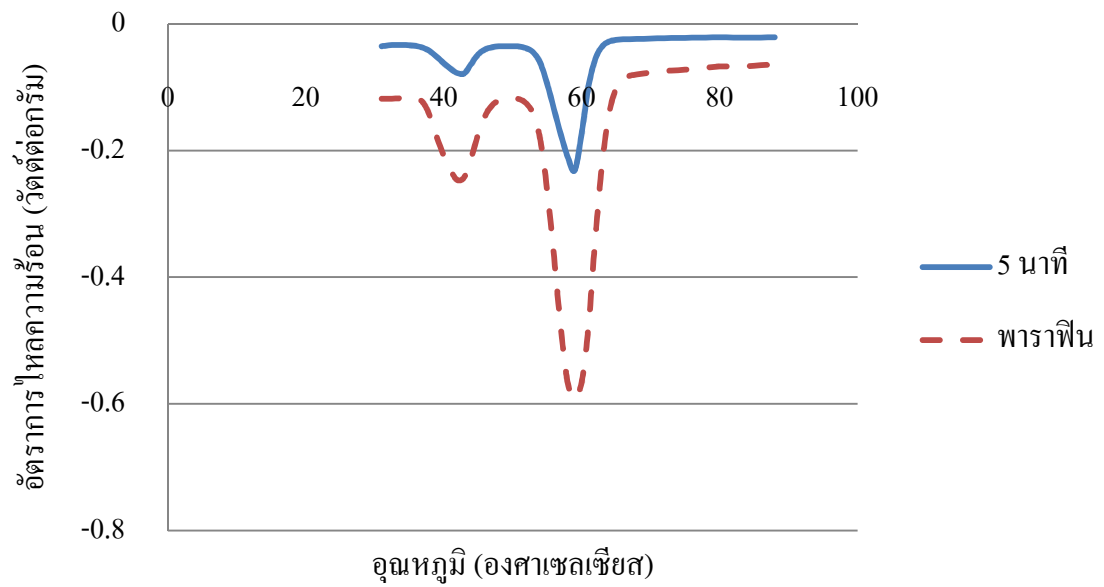
เวลาในการแช่ตัวอย่างในพาราฟินมีส่วนสำคัญในการดูดซับพาราฟิน ในการทดลองได้เลือกเวลาในการแช่ตัวอย่างที่ 5, 15, 30 และ 60 นาที และทำการศึกษาจุดหลอมเหลวและปริมาณของความร้อนแฝง โดยสภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของแต่ละตัวอย่างและกราฟ DSC ของแต่ละตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 13 และภาพที่ 39-43 ตามลำดับ

ตารางที่ 13 เวลาในการแช่ตัวอย่างในพาราฟินและสภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดลองและคุณสมบัติทางความร้อนของสารตัวอย่าง

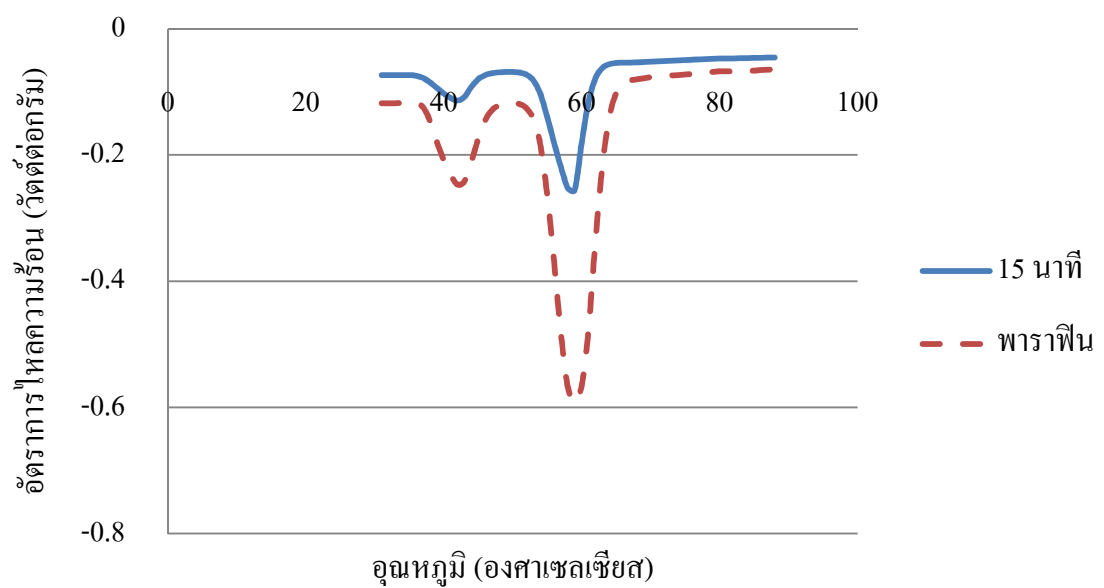
เวลาการแช่ ตัวอย่าง (นาที)	เวลา สุญญากาศ (นาที)	ความดัน สุญญากาศ (นิ้วปรอท)	อุณหภูมิ พาราฟิน (°C)	จุดหลอมเหลว พาราฟิน (°C)	ความร้อนแฝง (จูลต่อกรัม)
5	30	30	90	58.90	58.46
15	30	30	90	58.61	59.02
30	30	30	90	58.88	60.57
60	30	30	90	58.77	62.24



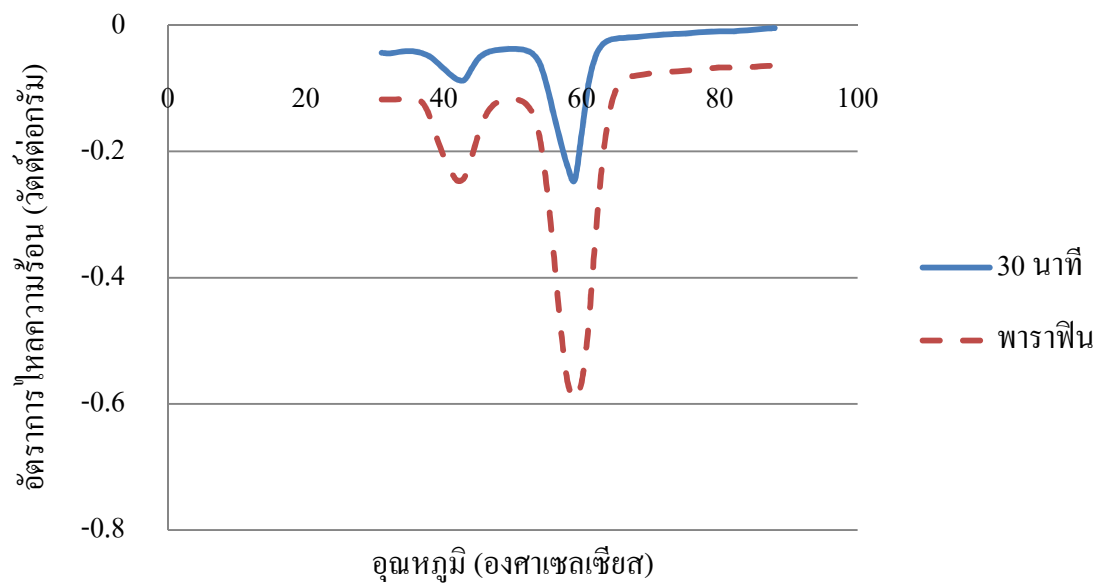
ภาพที่ 38 ผลของเวลาการแช่พาราฟินต่อค่าความร้อนแฝง



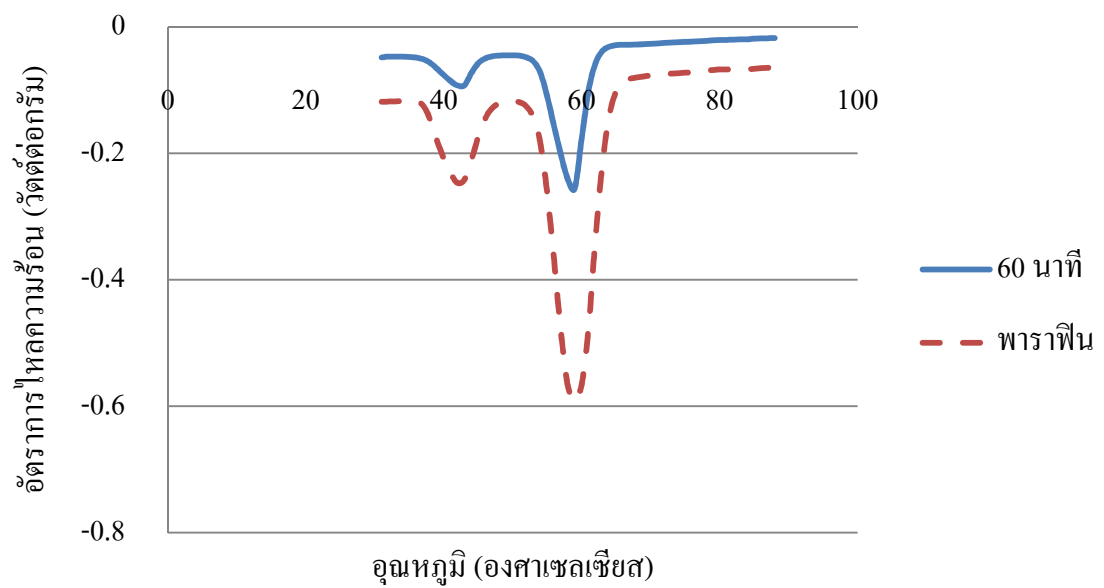
ภาพที่ 39 กราฟ DSC ที่เวลาการแช่พาราฟิน 5 นาที



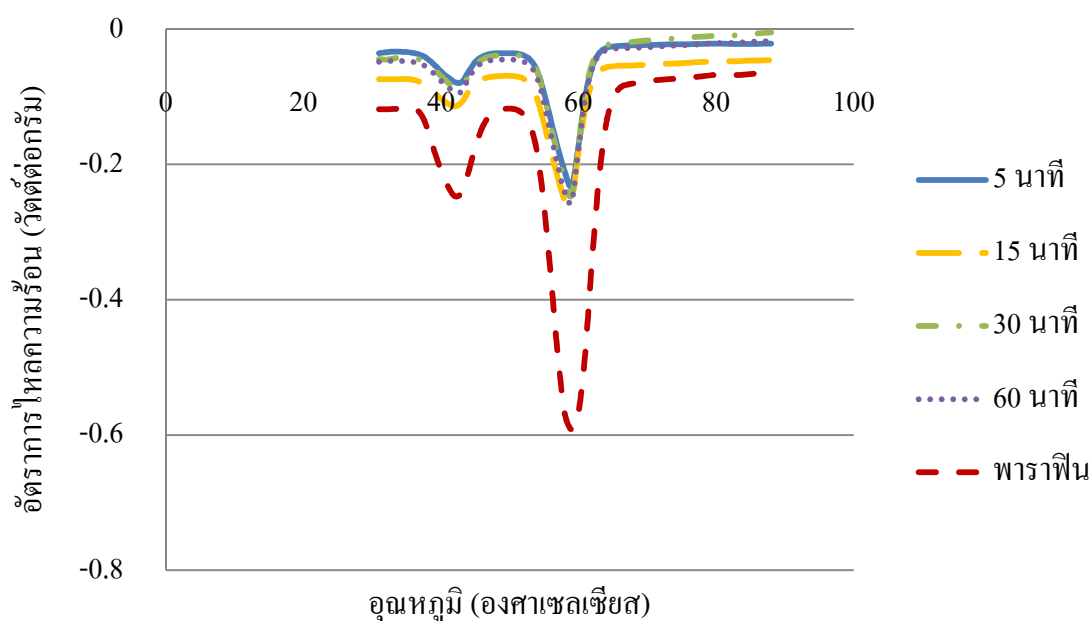
ภาพที่ 40 กราฟ DSC ที่เวลาการแช่พาราฟิน 15 นาที



ภาพที่ 41 กราฟ DSC ที่เวลาการแช่พาราฟิน 30 นาที



ภาพที่ 42 กราฟ DSC ที่เวลาการแช่พาราฟิน 60 นาที



ภาพที่ 43 กราฟ DSC ที่เวลาการแช่พาราฟินต่างๆ

จากตารางที่ 13 และภาพที่ 38 จะเห็นว่าเมื่อเวลาการแช่พาราฟินเพิ่มมากขึ้นค่าความร้อนแฝงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่เป็นเช่นนี้เพราะยิ่งเวลาการแช่พาราฟินนานมากขึ้นเท่าไรเด็กลอยก็มีเวลาในการดูดซับพาราฟินมากขึ้น แม้ว่าการใช้เวลาในแช่พาราฟินนานจะทำให้ได้ค่าความร้อนแฝงที่สูงขึ้นแต่ในระดับอุตสาหกรรมการใช้เวลานานอาจทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นหรือสูญเสียผลกำไรที่ควรจะได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามค่าความร้อนแฝงที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานไม่ควรต่ำกว่า 60 จูลต่อกรัม ดังนั้นเวลาในการแช่พาราฟินที่เหมาะสมคือ 30 นาที

จุดหลอมเหลวของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs มีค่าอยู่ในช่วง 58-59 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับของพาราฟินและกราฟ DSC ของแต่ละเวลาการแช่พาราฟินก็มีลักษณะคล้ายกับกราฟ DSC ของพาราฟิน ดังนั้นการผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs จึงไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น

ตารางที่ 14 เปรี่เซ้นต์ความร้อนแฝงของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ที่เวลาการแช่ พาราฟินต่างๆ เทียบกับพาราฟิน

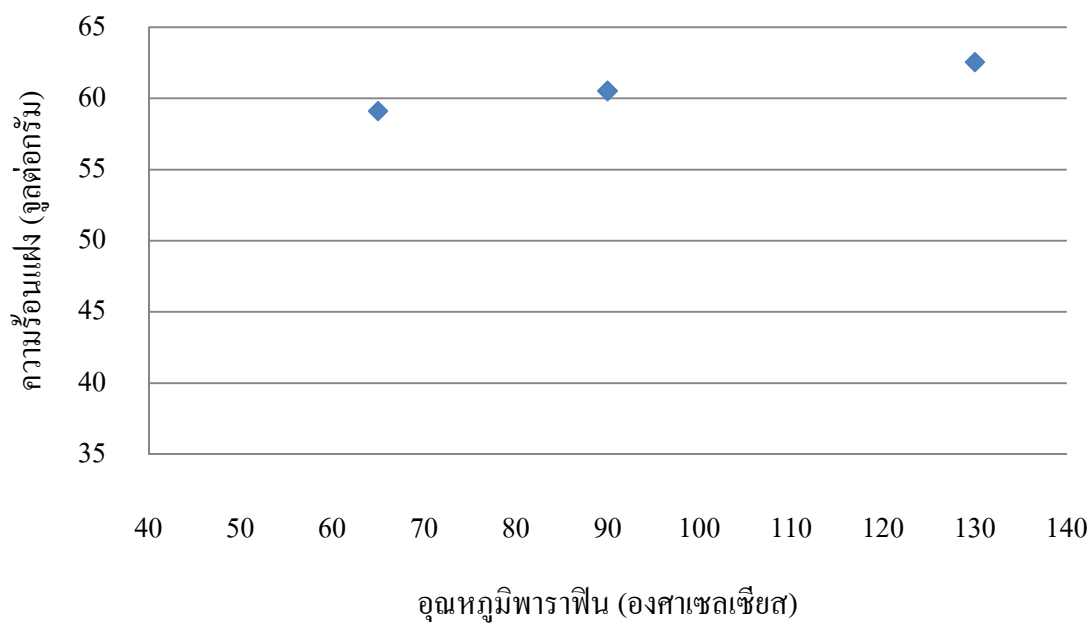
เวลาในการแช่พาราฟิน (นาทื)	ความร้อนแฝง (จุลต่อกรัม)	$\frac{\text{ความร้อนแฝงคอมโพสิท}}{\text{ความร้อนแฝงพาราฟิน}} \times 100$
5	58.46	31.75 %
15	59.02	32.06 %
30	60.57	32.90 %
60	62.24	33.81 %

3.3 ผลกระทบของอุณหภูมิพาราฟิน

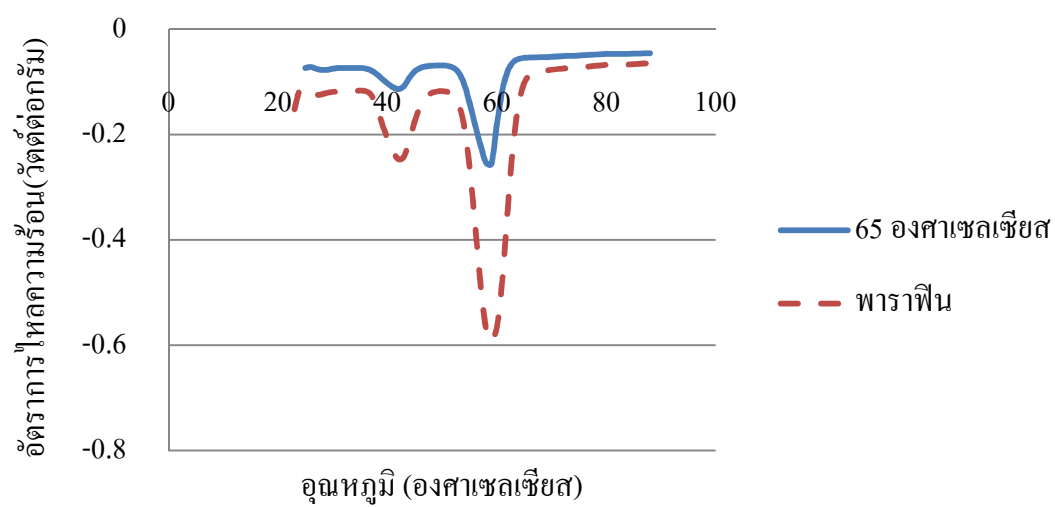
อุณหภูมิของพาราฟินหลอมเหลวมีส่วนสำคัญในการดูดซับพาราฟิน อุณหภูมิที่สูงการดูดซับพาราฟินของแก้วลอยควรจะดีขึ้นเพราะความหนืดของพาราฟินจะมีค่าลดลง ในการทดลองได้เลือกอุณหภูมิของพาราฟินที่ 65, 90 และ 130 องศาเซลเซียส และจึงทำการศึกษาจุดหลอมเหลวและปริมาณของความร้อนแฝง โดยสภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของแต่ละตัวอย่างและกราฟ DSC ของแต่ละตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 15 และภาพที่ 45-48 ตามลำดับ

ตารางที่ 15 อุณหภูมิของพาราฟินและสภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดลองและคุณสมบัติทางความร้อนของสารตัวอย่าง

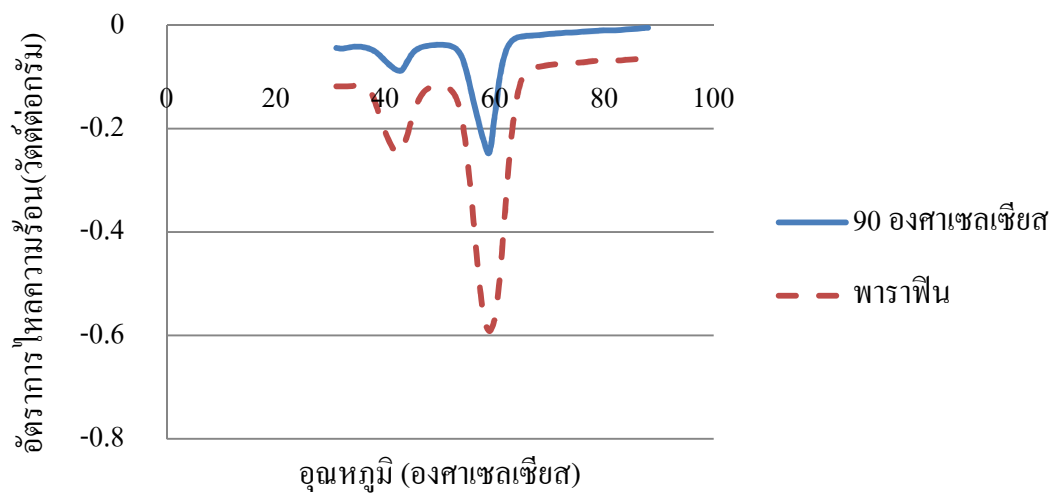
อุณหภูมิ พาราฟิน (°C)	เวลา สุญญากาศ (นาทื)	ความดัน สุญญากาศ (นิ้วปรอท)	เวลาการแช่ แก้วลอย (นาทื)	จุดหลอมเหลว พาราฟิน (°C)	ความร้อนแฝง (จุลต่อกรัม)
65	30	30	30	58.61	59.11
90	30	30	30	58.88	60.51
130	30	30	30	58.54	62.54



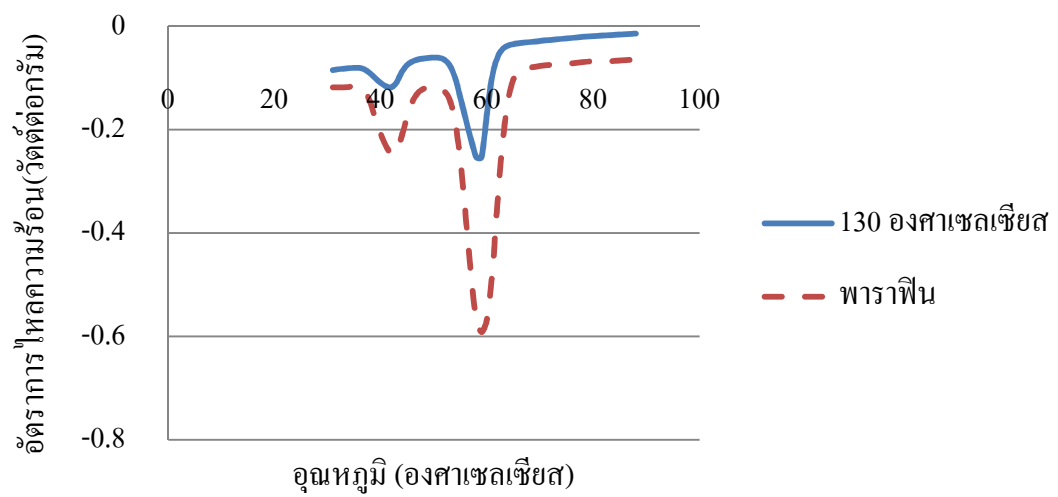
ภาพที่ 44 ผลของอุณหภูมิพาราฟินต่อค่าความร้อนแฝง



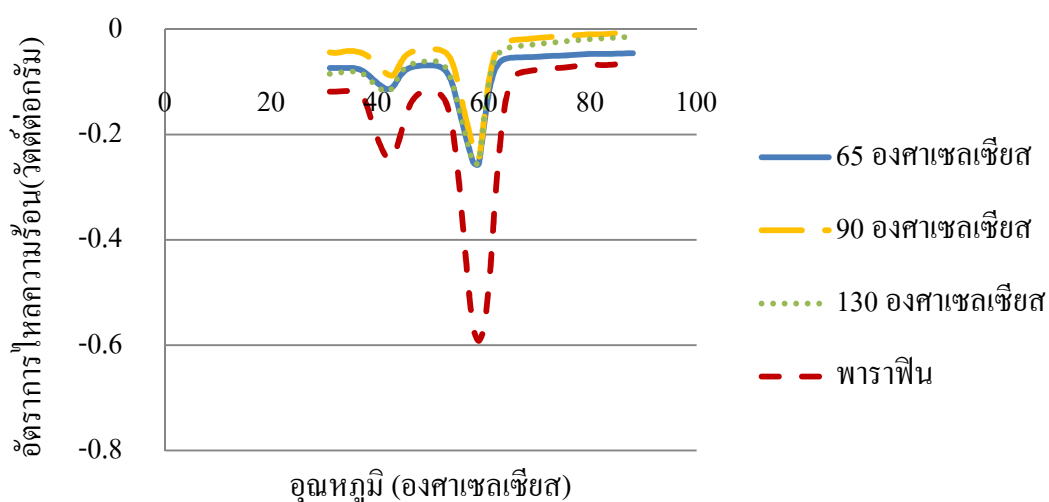
ภาพที่ 45 กราฟ DSC ที่อุณหภูมิพาราฟิน 65 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 46 กราฟ DSC ที่อุณหภูมิพาราฟิน 90 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 47 กราฟ DSC ที่อุณหภูมิพาราฟิน 130 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 48 กราฟ DSC ที่อุณหภูมิพาราฟินต่างๆ

จากตารางที่ 15 และภาพที่ 44 จะเห็นว่าอุณหภูมิของพาราฟินที่เพิ่มขึ้นทำให้การดูดซับพาราฟินของถั่วลอยเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐาน เพราะอุณหภูมิของพาราฟินที่เพิ่มขึ้นทำให้ความหนืดของพาราฟินลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิของพาราฟินให้สูงขึ้นมากๆ เพื่อที่ถั่วลอยจะได้ดูดซับพาราฟินได้มากๆ นั้นอาจจะไม่เป็นผลดีต่อการผลิตในระดับอุตสาหกรรม เพราะการเพิ่มอุณหภูมิหมายถึงการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการให้ความร้อนแก่พาราฟิน ในการทดลองอุณหภูมิที่ 90 องศาเซลเซียสถือเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs เพราะนอกจากจะใช้อุณหภูมิที่ไม่สูงมากนักแล้ว ค่าความร้อนแฝงก็มีสูงถึง 60.51 จูลต่อกรัมซึ่งเพียงพอที่จะนำมาใช้งานต่อไป

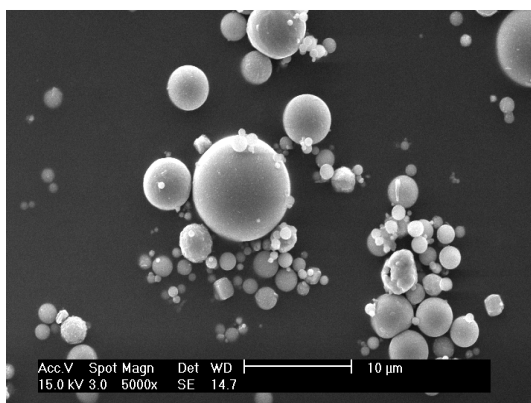
จุดหลอมเหลวของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs มีค่าอยู่ในช่วง 58-59 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับของพาราฟินและกราฟ DSC ของแต่ละอุณหภูมิพาราฟินก็มีลักษณะคล้ายกับกราฟ DSC ของพาราฟิน ดังนั้นการผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs จึงไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น

ตารางที่ 16 เปอร์เซ็นต์ความร้อนแฝงของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ที่อุณหภูมิพาราฟิน
ต่างๆ เทียบกับพาราฟิน

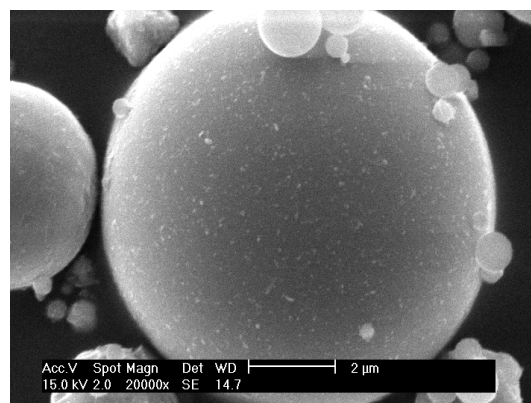
อุณหภูมิพาราฟิน (องศาเซลเซียส)	ความร้อนแฝง (จูลต่อกรัม)	$\frac{\text{ความร้อนแฝงคอมโพสิต}}{\text{ความร้อนแฝงพาราฟิน}} \times 100$
65	59.11	32.11 %
90	60.51	32.86 %
130	62.54	33.97 %

4. การศึกษาหาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

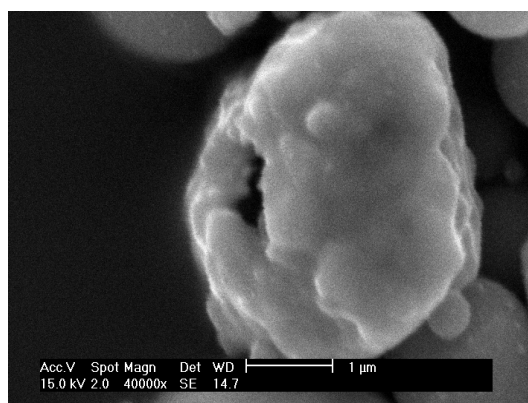
การทดสอบนี้ทำการถ่ายภาพโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ PHILIPS รุ่น XL30 เพื่อดูลักษณะทางกายภาพของแก้วลอยและ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ในระดับไมโครสเกลและเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแต่ละวัสดุ โดยภาพ SEM ของแก้วลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ BLCP และ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs แสดงดังภาพที่ 49-51 ตามลำดับ



ก. ภาพกำลังขยาย 5000 เท่า



ข. ภาพกำลังขยาย 20000 เท่า



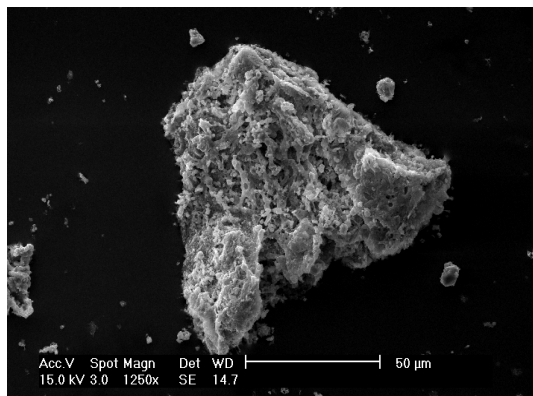
ค. รูพรุนเถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ

ภาพที่ 49 ภาพถ่าย SEM เถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ

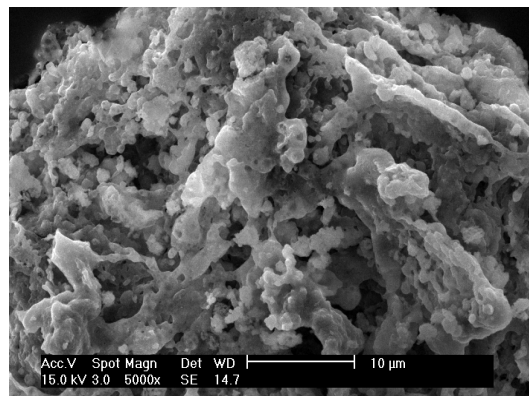
เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าของโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะนั้นใช้ความร้อนในการเผาถ่านหินที่อุณหภูมิ 1100-1400 องศาเซลเซียสซึ่งถือว่าเป็นอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง ทำให้เถ้าลอยที่ได้เกิดการหลอมละลายและปิดรูพรุนของตัวเถ้าลอยเอง จากภาพที่ 49 จะเห็นว่าเถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะส่วนใหญ่มีลักษณะกลมและมีรูพรุนน้อยมาก ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำมาทำเป็นสารดูดซับในการผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs

อย่างไรก็ตามแม้ว่ารูพรุนของเถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะจะน้อยแต่ในแง่ของวัสดุปอซโซลานเถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะได้รับความนิยมอย่างมากในการนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์เมื่อเทียบกับเถ้าลอยที่ได้จากแหล่งอื่น เพราะรูปร่างที่กลมทำให้สามารถลดความฝืด

ระหว่างผงบูนซีเมนต์จึงทำให้ความต้องการน้ำในการผสมลดลงในขณะที่ความสามารถในการเทยังคงเท่าเดิม



ก. ภาพกำลังขยาย 1250 เท่า

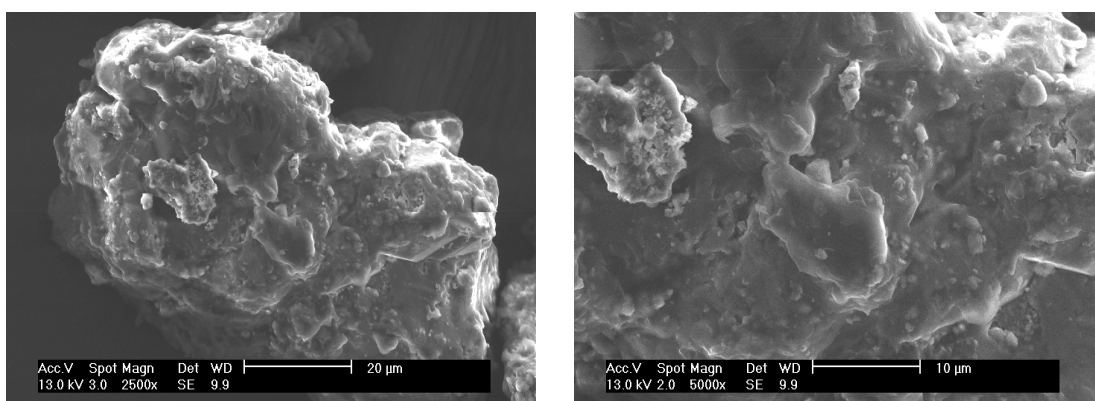


ข. ภาพกำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพที่ 50 ภาพถ่าย SEM ถ้ำลอยจากโรงงานไฟฟ้า BLCP

จากภาพที่ 50 จะเห็นว่าถ้ำลอยจากโรงงานไฟฟ้า BLCP มีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและมีรูพรุนเยอะมาก ทั้งนี้เป็นเพราะโรงงานไฟฟ้า BLCP ใช้ความร้อนในการเผาถ่านหินที่อุณหภูมิไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส ซึ่งถือว่าเป็นอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำทำให้ถ้ำลอยไม่เกิดการหลอมละลายและเกิดรูพรุนที่ถ้ำลอยมากมาย

ถ้ำลอยจากโรงงานไฟฟ้า BLCP เหมาะสมที่จะนำมาผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs เป็นอย่างมาก เพราะมีรูพรุนมากเหมาะที่จะนำมาทำเป็นสารดูดซับ



ก. ภาพกำลังขยาย 2500 เท่า

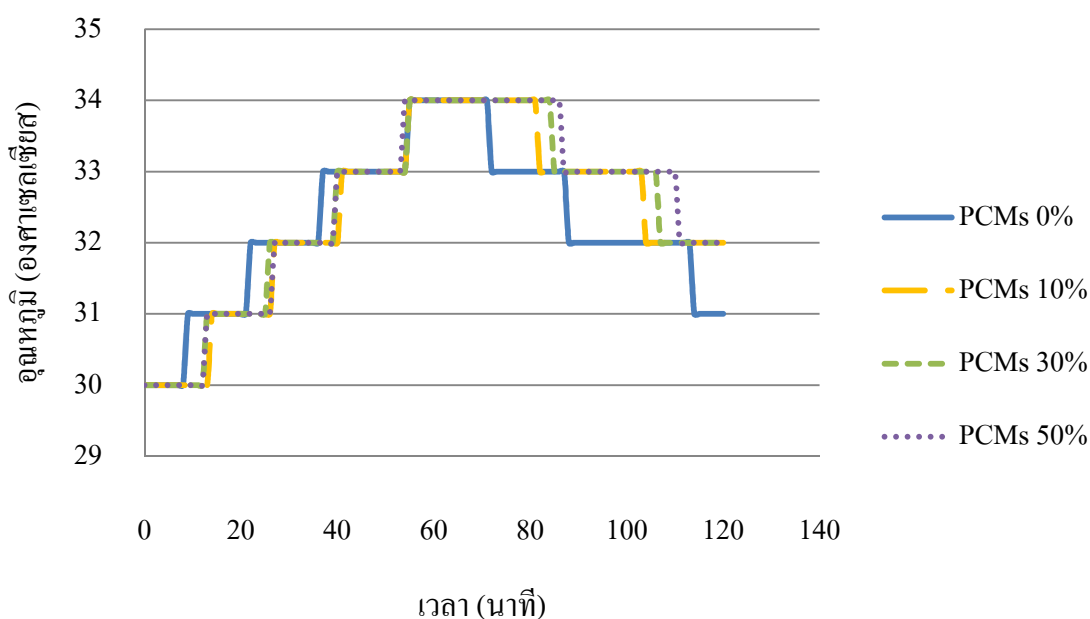
ข. ภาพกำลังขยาย 5000 เท่า

ภาพที่ 51 ภาพถ่าย SEM Paraffin / Fly Ash Composite PCMs

ภาพที่ 51 แสดงภาพ SEM ของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ที่ผลิตขึ้นได้ที่สภาวะความดันสุญญากาศ 30 นิ้วปรอท เวลาสุญญากาศ 30 นาที อุณหภูมิพาราฟิน 90 องศาเซลเซียสและเวลาการแช่พาราฟิน 30 นาที โดยใช้ถ้ำลอยจากโรงงานไฟฟ้า BLCP เป็นสารดูดซับ เมื่อเปรียบเทียบภาพที่ 50 กับภาพที่ 51 จะเห็นว่าพาราฟินได้ถูกดูดซับเข้ารูพรุนของถ้ำลอยจนเกือบสมบูรณ์

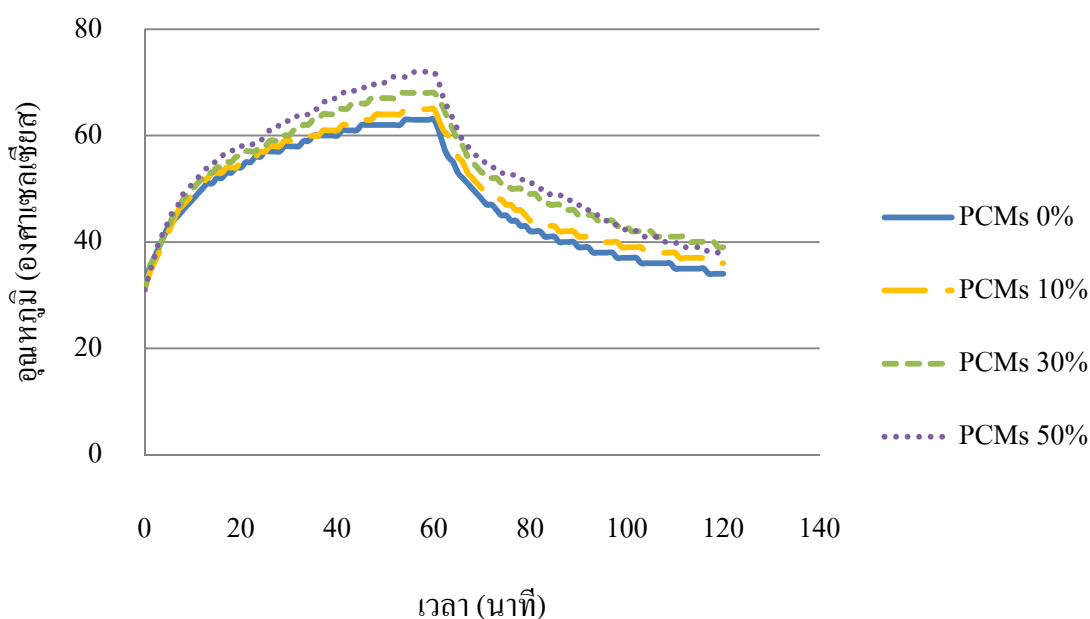
5. ทดสอบประสิทธิภาพด้านการกันความร้อน

การทดสอบประสิทธิภาพด้านการกันความร้อนทำโดยการสร้างห้องจำลองขนาด 150 x 150 x 150 มิลลิเมตร หนาด้านละ 2 เซนติเมตร โดยปิดด้านบนของห้องจำลองด้วยมอร์ตาร์เพทและมอร์ตาร์ PCMs เพท ซึ่งหนา 2 เซนติเมตรเช่นกัน จากนั้นจึงนำหลอดไฟมาไว้เหนือห้องจำลองและทำการเปิดไฟเพื่อให้ความร้อนแก่ห้องจำลอง แล้วจึงทำการตรวจวัดอุณหภูมิภายในห้องจำลองและที่บริเวณผิวด้านบนของห้องจำลองเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วจึงทำการปิดไฟและทำการตรวจวัดอุณหภูมิภายในห้องจำลองและที่บริเวณผิวด้านบนของห้องจำลองอีกเป็นเวลา 1 ชั่วโมงผลการทดลองได้แสดงดังภาพที่ 52 และภาพที่ 53 ตามลำดับ



ภาพที่ 52 กราฟแสดงอุณหภูมิภายในห้องจำลองที่เวลาต่างๆ

ภาพที่ 52 แสดงกราฟประสิทธิภาพการกักความร้อนของมอร์ตาร์เพทและมอร์ตาร์ PCMs เพทที่เปอร์เซ็นต์ PCMs ต่างๆ จากกราฟช่วงเวลา 60 นาทีแรกเป็นช่วงเวลาที่เปิดไฟเพื่อให้ความร้อนแก่ห้องจำลอง จะเห็นว่าห้องจำลองที่ด้านบนเป็นมอร์ตาร์เพทอุณหภูมิห้องจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าอุณหภูมิห้องที่ด้านบนเป็นมอร์ตาร์ PCMs เพท ที่เป็นเช่นนี้เพราะในระหว่างที่มอร์ตาร์ PCMs เพทได้รับความร้อนนั้นพาราฟินซึ่งทำหน้าที่เป็น PCMs จะดูดซับพลังงานความร้อนและนำพลังงานความร้อนนั้นไปทำการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลวทำให้อุณหภูมิภายในห้องเพิ่มขึ้นช้ากว่าห้องจำลองที่ด้านบนเป็นมอร์ตาร์เพท ส่วนในช่วง 60 นาทีสุดท้ายจะเป็นช่วงเวลาที่ปิดไฟจะเห็นว่าห้องจำลองที่ด้านบนเป็นมอร์ตาร์เพทจะสามารถลดอุณหภูมิห้องได้เร็วกว่าห้องที่ด้านบนเป็นมอร์ตาร์ PCMs เพทที่เป็นเช่นนี้เพราะในระหว่างที่ปิดไฟนั้นพาราฟินจะคายพลังงานความร้อนออกมาเพื่อเปลี่ยนสถานะกลับคืนไปเป็นของแข็ง ความร้อนบางส่วนที่คายออกมาก็จะเข้าไปยังห้องจำลอง ทำให้ห้องจำลองที่ด้านบนเป็นมอร์ตาร์ PCMs เพทสามารถรักษาอุณหภูมิห้องได้นานกว่าห้องจำลองที่ด้านบนเป็นมอร์ตาร์เพท



ภาพที่ 53 กราฟแสดงอุณหภูมิผิวที่เวลาต่างๆ

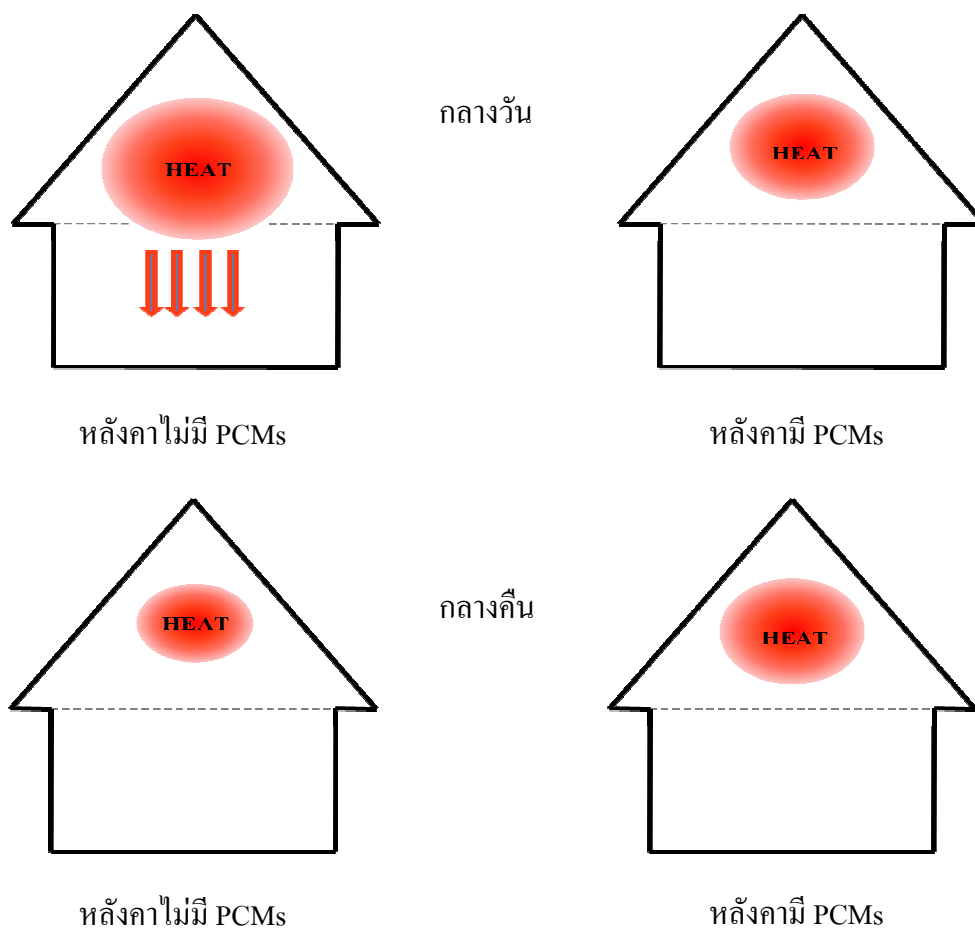
ภาพที่ 53 แสดงอุณหภูมิผิวของมอร์ตาร์เปลทและมอร์ตาร์ PCMs เปลทที่เปอร์เซ็นต์ PCMs ต่างๆ จากกราฟช่วงเวลา 60 นาทีแรกเป็นช่วงเวลาที่เปิดไฟเพื่อให้ความร้อนแก่ห้องจำลอง จะเห็นว่า ที่นาทีที่ 60 อุณหภูมิผิวของมอร์ตาร์ PCMs เปลท 50% มีอุณหภูมิผิวสูงที่สุดคือที่ 72 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิผิวของมอร์ตาร์เปลทมีอุณหภูมิผิวดำสุดคือ 63 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิผิวของมอร์ตาร์ PCMs เปลทจะลดลงสอดคล้องกับปริมาณเปอร์เซ็นต์ของ PCMs ที่ผสมอยู่ในเปลท

สำหรับประเทศที่มีภูมิอากาศร้อนนั้น จากการทดลองจะเห็นว่าการดูดพลังงานความร้อนของมอร์ตาร์ PCMs เปลทในช่วงที่เปิดไฟนั้นสามารถป้องกันพลังงานความร้อนเข้าสู่ห้องจำลองได้ แต่เมื่อปิดไฟจะเกิดการคายพลังงานความร้อนเข้าสู่ห้องจำลองซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ จากภาพที่ 52 จะเห็นว่าปริมาณ PCMs ที่ 10, 30 และ 50 เปอร์เซ็นต์มีความสามารถในการป้องกันพลังงานความร้อนได้ใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้เป็นเพราะพลังงานความร้อนของหลอดไฟที่ให้แก่มอร์ตาร์ PCMs เปลทนั้นใช้ปริมาณ PCMs เพียง 10 เปอร์เซ็นต์ก็เพียงพอสำหรับการดูดซับพลังงานความร้อนจากหลอดไฟแล้ว ดังนั้นเมื่อปริมาณ PCMs เพิ่มมากขึ้นจึงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อน แต่จะสามารถดูดซับพลังงานความร้อนได้มากขึ้นตามปริมาณ PCMs ที่เพิ่มมากขึ้น ดังที่เห็นในการทดลองว่า เมื่อถึงช่วงเวลาที่ปิดไฟปริมาณ PCMs 10 เปอร์เซ็นต์จะคายพลังงานความร้อนออกมาน้อยที่สุดและที่ปริมาณ PCMs 50 เปอร์เซ็นต์จะคายพลังงานออกมามากที่สุด ดังนั้นการเลือกปริมาณ PCMs ที่เหมาะสมต่อการใช้งานนั้นจำเป็นต้องศึกษาถึงปริมาณความร้อนที่ได้รับใน

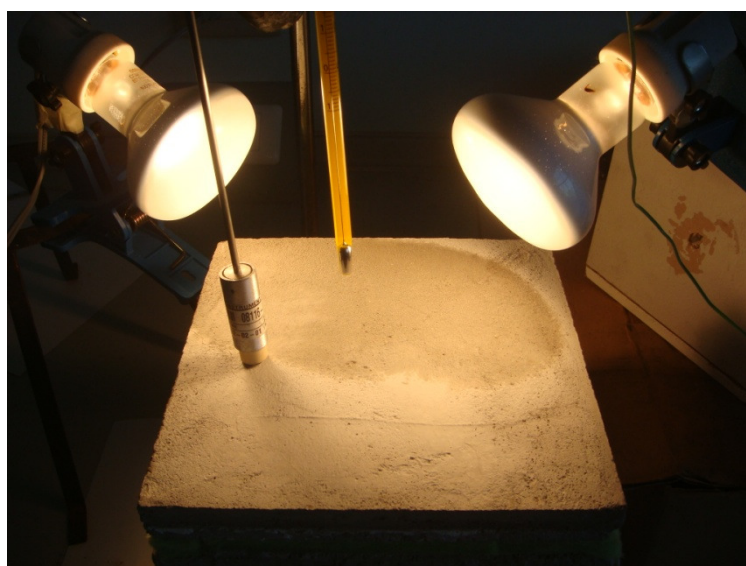
บริเวณที่จะนำ PCMs ไปใช้ เพื่อที่จะได้ทดลองหาปริมาณ PCMs ที่เพียงพอต่อการดูดซับพลังงานความร้อนและคายพลังงานความร้อนออกมาน้อยที่สุด

ปัญหาการปลดปล่อยพลังงานความร้อนของ PCMs นั้น อาจแก้ไขได้โดยอาศัยวิธีการนำไปใช้หรือตำแหน่งที่จะนำ PCMs ไปใช้ เช่น ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตหลังคา โดยปกติแล้วความร้อนที่เข้าสู่ที่พักออาศัยทางหลังคาจะก่อตัวเกิดเป็นมวลความร้อนใต้หลังคา ซึ่งขนาดของมวลความร้อนจะขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่สามารถผ่านหลังคาลงมาได้ ในเวลากลางวันถ้ามวลความร้อนมีขนาดใหญ่จะทำให้ความร้อนสามารถแผ่เข้ามาในที่พักออาศัยทำให้อุณหภูมิภายในสูงขึ้น แต่ถ้าหลังคาที่ใช้มีส่วนผสมของ PCMs ผสมอยู่ก็จะสามารถลดขนาดของมวลความร้อนลงได้ ทำให้ความร้อนไม่แผ่เข้าสู่ที่พักออาศัย และเมื่อถึงเวลากลางคืน PCMs จะมีการคายพลังงานความร้อนออกมา ซึ่งพลังงานความร้อนส่วนหนึ่งจะคายออกภายนอกที่พักออาศัยเนื่องจากการพาของลม (Convection) และส่วนหนึ่งจะคายเข้าสู่ใต้หลังคา (Conduction) ทำให้มวลความร้อนใต้หลังคามีขนาดเท่าเดิมหรืออาจจะมียขนาดเล็กลงกว่าเดิมดังภาพที่ 54

อย่างไรก็ตามในการทดลอง การให้ความร้อนแก่มอร์ตาร์ PCMs เพลทนั้นจะมีการรั่วไหลของพาราฟินเกิดขึ้นเล็กน้อยดังภาพที่ 55 และภาพที่ 56 การรั่วไหลที่เกิดขึ้นจะเป็นลักษณะเหมือนรอยเปียกแต่เมื่อสัมผัสที่ผิวมอร์ตาร์ PCMs เพลทจะไม่มีรอยเปียกที่มือแต่อย่างใด ซึ่งปัญหาเรื่องรอยเปียกนี้สามารถแก้ไขได้โดยการทาสีที่มอร์ตาร์ PCMs เพลทเพื่อปกปิดรอยที่เกิดขึ้นดังภาพที่ 57



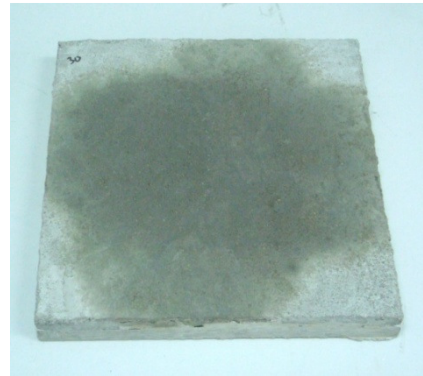
ภาพที่ 54 การแก้ปัญหาการปลดปล่อยพลังงานความร้อนของ PCMs



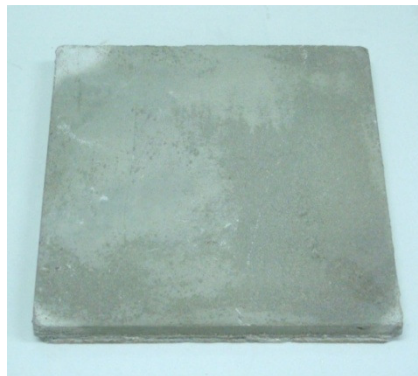
ภาพที่ 55 การร่วซึมของมอร์ตาร์ PCMs เพลท



ก. มอร์ตาร์ PCMs เฟลทที่ 10 เปอร์เซ็นต์



ข. มอร์ตาร์ PCMs เฟลทที่ 30 เปอร์เซ็นต์



ค. มอร์ตาร์ PCMs เฟลทที่ 50 เปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 56 การร่วซึมของมอร์ตาร์ PCMs เฟลทที่เปอร์เซ็นต์ PCMs ต่างๆ



ภาพที่ 57 มอร์ตาร์ PCMs เฟลททาสี

6. ทดสอบประสิทธิภาพด้านความแข็งแรง

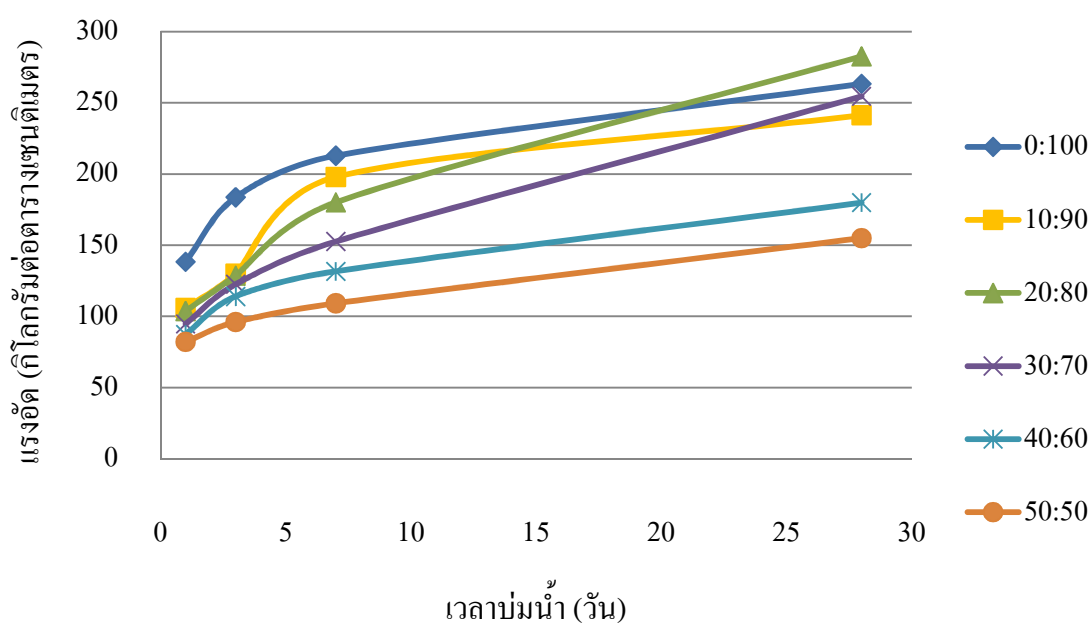
การทดสอบประสิทธิภาพด้านความแข็งแรงนี้ได้นำตัวอย่างจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ โรงงานไฟฟ้า BLCP และ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs มาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนต่างๆ แล้วทำการหล่อเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตรดังภาพที่ 58 จากนั้นทิ้งให้แข็งตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจึงแกะออกจากแบบและนำไปบ่มน้ำเป็นเวลา 1, 3, 7, 28 วัน ถึงจะนำไปทดสอบแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดเพื่อทดสอบประสิทธิภาพด้านความแข็งแรงต่อไป ผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 17-19 และภาพที่ 59-66



ภาพที่ 58 สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร

ตารางที่ 17 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่อัตราส่วนต่างๆ

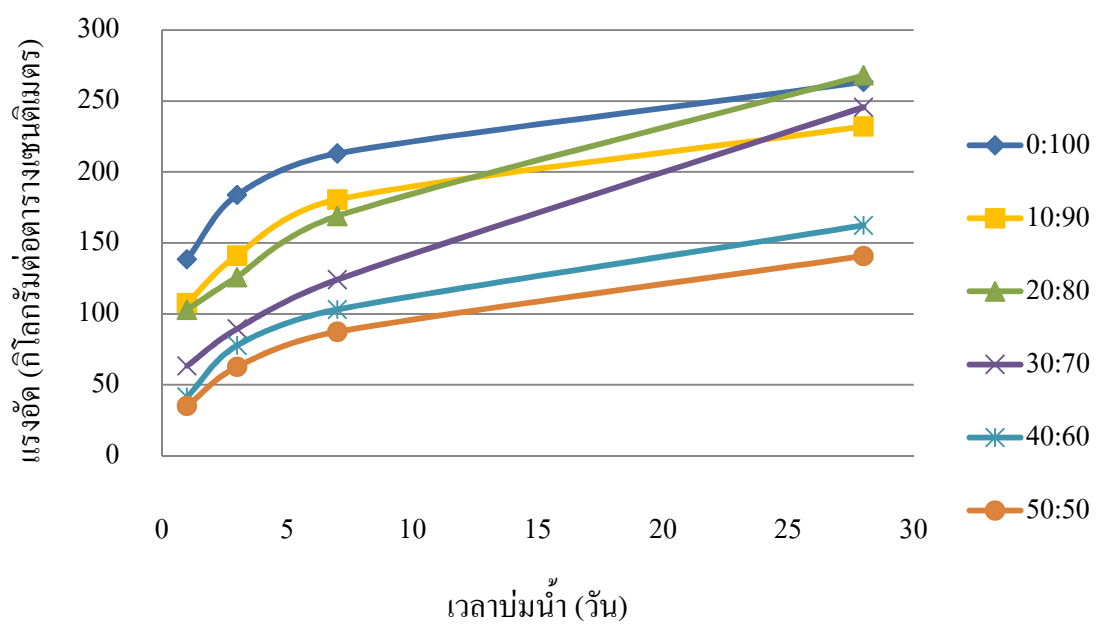
แม่เมาะ : ปูน	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน
0 : 100	138.4	183.7	212.9	263.3
10 : 90	106.0	130.1	197.9	241.3
20 : 80	103.7	128.6	180.1	282.6
30 : 70	94.8	122.6	152.7	254.6
40 : 60	87.4	114.0	131.6	179.8
50 : 50	82.1	96.0	109.2	155.0



ภาพที่ 59 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 18 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย BLCP ที่อัตราส่วนต่างๆ

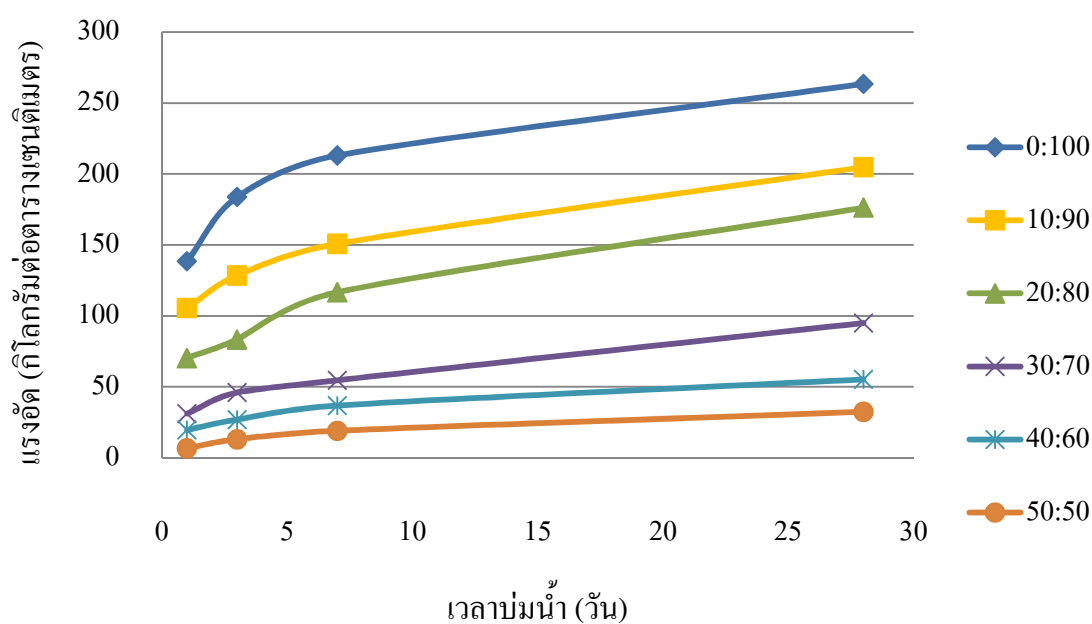
BLCP : ปูน	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน
0 : 100	138.4	183.7	212.9	263.3
10 : 90	107.5	141.0	180.5	232.0
20 : 80	102.9	125.9	168.9	268.0
30 : 70	63.3	89.4	124.1	245.6
40 : 60	41.4	77.7	103.0	162.3
50 : 50	35.1	62.6	87.3	140.6



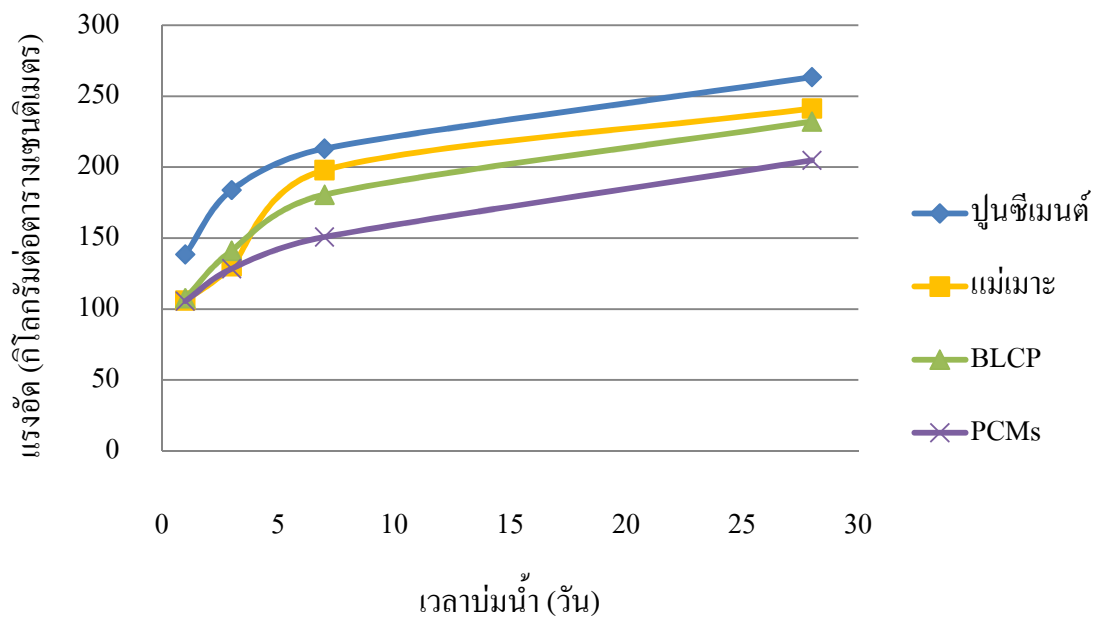
ภาพที่ 60 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย BLCP ที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 19 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสม PCMs ที่อัตราส่วนต่างๆ

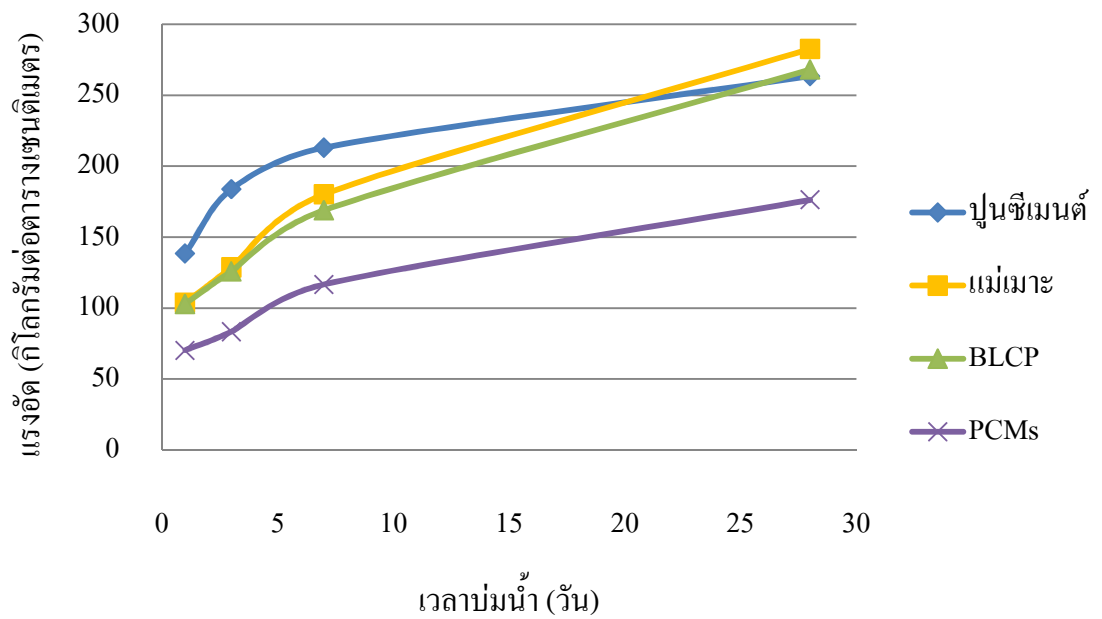
PCMs : ปูน	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน
0 : 100	138.4	183.7	212.9	263.3
10 : 90	105.5	128.4	150.7	204.7
20 : 80	70.2	83.3	116.6	176.2
30 : 70	31.0	45.9	54.5	94.8
40 : 60	19.5	26.8	36.7	55.2
50 : 50	6.6	12.9	18.9	32.3



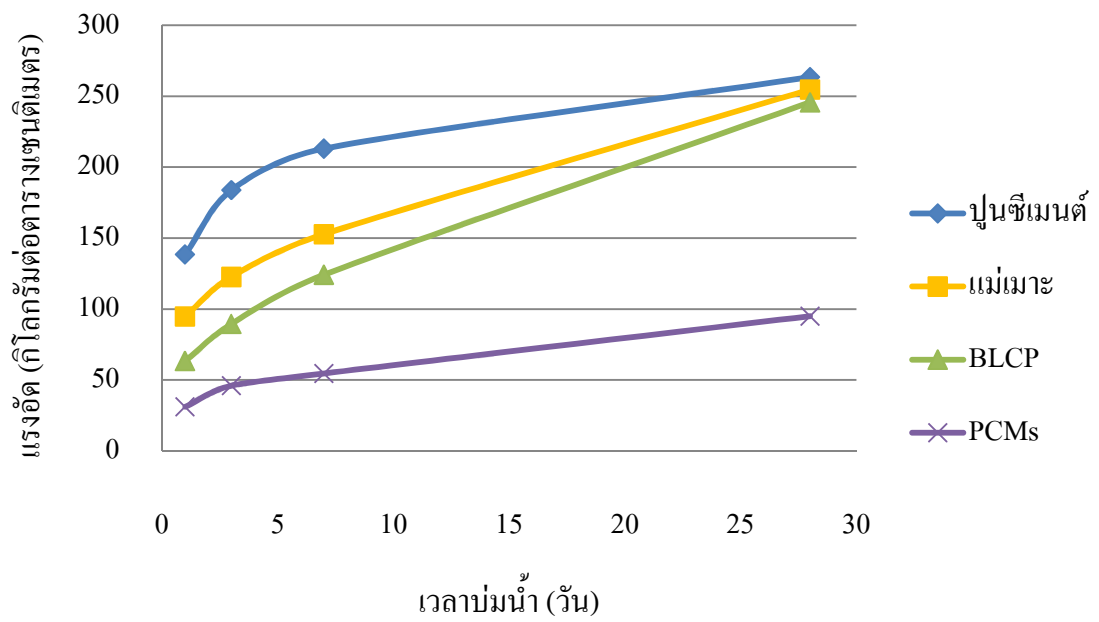
ภาพที่ 61 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสม PCMs ที่อัตราส่วนต่างๆ



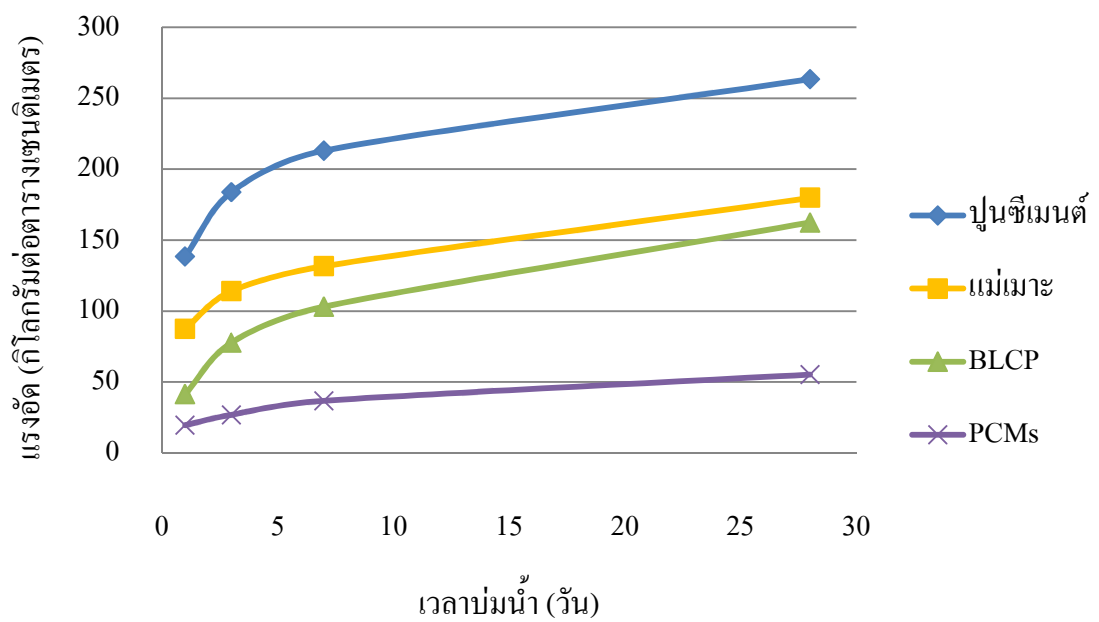
ภาพที่ 62 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน 10:90



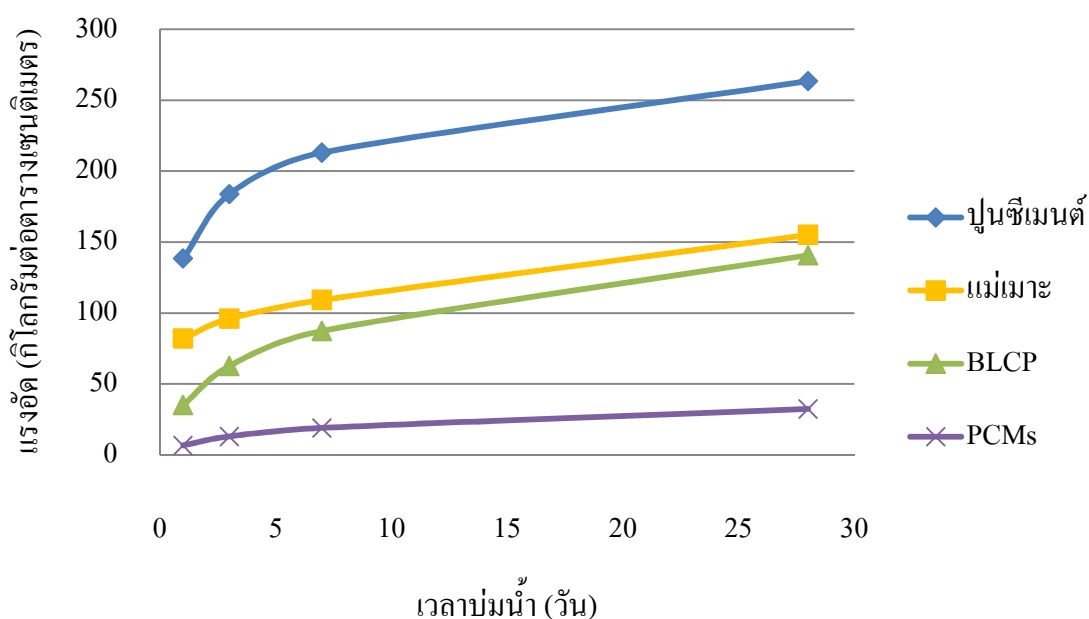
ภาพที่ 63 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน 20:80



ภาพที่ 64 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน 30:70



ภาพที่ 65 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน 40:60



ภาพที่ 66 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน 50:50

จากตารางที่ 17-19 และภาพที่ 59-61 จะเห็นว่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ BLCP และ PCMs ทุกอัตราส่วนในช่วงแรก (1, 3, 7 วัน) มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งกำลังรับแรงอัดจะลดลงเมื่อปริมาณของส่วนผสมเพิ่มมากขึ้นที่เป็นเช่นนี้เพราะในช่วงแรกความแข็งแรงของมอร์ตาร์เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) เมื่อปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกทดแทนด้วยวัสดุอื่นทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้น้อยลง อย่างไรก็ตามหากวัสดุทดแทนเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) เช่นเถ้าลอย ความแข็งแรงของมอร์ตาร์เมื่อเวลานานขึ้น (28 วัน) ก็อาจจะเท่ากับความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ เพราะเมื่อเวลาผ่านไปวัสดุปอซโซลานจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้มอร์ตาร์มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น กำลังรับแรงอัดจึงเพิ่มมากขึ้น

ที่อัตราส่วน 20:80 ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ และ BLCP จะเห็นว่าเมื่อเวลานานขึ้น (28 วัน) มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าค่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทั้งนี้เป็นเพราะที่อัตราส่วนนี้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีปริมาณที่เหมาะสมพอดีกับวัสดุปอซโซลาน ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นได้มากความแข็งแรงของมอร์ตาร์จึงสูงกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วน 20:80 และที่อัตราส่วนอื่นๆ ของปูนซีเมนต์ผสม PCMs ค่ากำลังรับแรงอัดไม่ได้สูงกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เลย เนื่องจาก

ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอยและเมื่อนำเถ้าลอยมาทำการดูดซับพาราฟิน จึงทำให้พาราฟินเคลือบปิดผิวของเถ้าลอย ดังนั้นปฏิกิริยาปอซโซลานจึงเกิดขึ้นได้น้อย ความแข็งแรงของมอร์ตาร์ PCMs จึงต่ำ ค่ากำลังรับแรงอัดจึงมีค่าต่ำ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้แบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วน คือ การผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs และการทดสอบประสิทธิภาพของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ในส่วนของการผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ได้ใช้วิธี Vacuum Impregnation ซึ่งได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิต ได้แก่ แหล่งของเถ้าลอย ความดันสุญญากาศ เวลาในการแช่เถ้าลอยในพาราฟินและอุณหภูมิของพาราฟินด้วยการนำไปตรวจคุณสมบัติทางด้านความร้อน ส่วนการทดสอบประสิทธิภาพของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ได้ทำการทดลองใช้งานร่วมกับปูนซีเมนต์และทดสอบถึงผลกระทบของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ต่อความแข็งแรงของวัสดุ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- เถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้า BLCP มีความเหมาะสมในการนำมาผลิต Paraffin / Fly Ash Composite PCMs มากกว่าเถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะเพราะมีปริมาณรุกรุนมากกว่า

- จากกราฟ DSC ที่ได้แสดงให้เห็นว่าไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างพาราฟินกับเถ้าลอย เพราะจุดหลอมเหลวของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs กับพาราฟินมีค่าใกล้เคียงกันและกราฟ DSC ก็มีลักษณะคล้ายกัน

- ที่ความดันสุญญากาศ 0 นิ้วปรอท หรือการดูดซับแบบธรรมชาติจะมีค่าความร้อนแฝงน้อยมากเมื่อเทียบกับที่ความดันสุญญากาศที่สูงกว่า เมื่อความดันสุญญากาศมากขึ้นค่าความร้อนแฝงก็จะเพิ่มมากขึ้นตามความดันสุญญากาศ เพราะสามารถกำจัดอากาศในรุกรุนของเถ้าลอยได้มากขึ้นทำให้การดูดซับพาราฟินเกิดได้ง่ายขึ้น

- เวลาในการแช่เถ้าลอยในพาราฟินเพิ่มมากขึ้นค่าความร้อนแฝงก็จะเพิ่มมากขึ้นตามเวลาที่แช่เพราะเถ้าลอยมีเวลาในการดูดซับพาราฟินนานขึ้น

- อุณหภูมิของพาราฟินเพิ่มมากขึ้นค่าความร้อนแฝงก็จะเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิของพาราฟิน เพราะอุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ความหนืดของพาราฟินลดลง การดูดซับจึงเกิดได้ง่ายขึ้น

- ประสิทธิภาพการกันความร้อนของมอร์ตาร์เพทและมอร์ตาร์ PCMs เพทในช่วง 60 นาทีแรก (เปิดไฟ) แสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์ PCMs เพทสามารถกันความร้อนได้ดีกว่ามอร์ตาร์เพท ส่วนในช่วง 60 นาทีสุดท้าย (ปิดไฟ) มอร์ตาร์เพทสามารถคายพลังงานความร้อนออกจากห้องได้เร็วกว่ามอร์ตาร์ PCMs เพท เพราะมอร์ตาร์ PCMs เพทคายพลังงานความร้อนที่สะสมไว้เข้าสู่ห้อง

- อัตราส่วนระหว่างถ้ำลอยต่อปูนซีเมนต์ที่มากขึ้นมีผลทำให้ความแข็งแรงของมอร์ตาร์ลดลง แต่อัตราส่วน 20:80 ที่ 28 วันมีความแข็งแรงมากกว่าปูนซีเมนต์เพราะปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีปริมาณที่เหมาะสมพอดีกับวัสดุปอชโซลาน ทำให้ปฏิกิริยาปอชโซลานเกิดขึ้นได้มากความแข็งแรงของมอร์ตาร์จึงสูงกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

- อัตราส่วนระหว่าง PCMs ต่อปูนซีเมนต์ที่มากขึ้นมีผลทำให้ความแข็งแรงของมอร์ตาร์ PCM ลดลงเพราะพาราฟินเคลือบปิดผิวของถ้ำลอยทำให้ปฏิกิริยาปอชโซลานเกิดขึ้นได้น้อย ความแข็งแรงของมอร์ตาร์ PCMs จึงขึ้นกับปฏิกิริยาไฮเดรชันเพียงอย่างเดียว เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงเป็นผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงด้วย

ข้อเสนอแนะ

- ในการตรวจคุณสมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ยี่ห้อ TA INSTRUMENT รุ่น SDT 2860 ที่จุดหลอมเหลวไม่สูงมากนัก ควรใช้ Heating rate ที่ 1 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อการตรวจสอบคุณสมบัติที่แม่นยำมากขึ้น

- ค่าความร้อนแฝงของ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs ขึ้นอยู่กับปริมาณพาราฟินที่ละลายดูดซับได้ จะเห็นว่าในการทดลองค่าความร้อนแฝงที่ได้มีค่าประมาณ 60 จูลต่อกรัม อย่างไรก็ตามหากสามารถหาแหล่งใหม่ที่มีปริมาณรูพรุนสูงๆ ได้จะทำให้สามารถเพิ่มค่าความร้อนแฝงได้มากขึ้น

- ทดลองนำ Paraffin / Fly Ash Composite PCM ไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์และนำไปทดลองใช้จริง

- ทำการทดสอบรอบการใช้ Paraffin / Fly Ash Composite PCMs เพื่อดูว่าหลังผ่านการใช้งานหลายๆ รอบแล้ว มีการสูญเสียคุณสมบัติทางความร้อนหรือไม่

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กิตติพงศ์ สุรงค์สุวรรณ และ ภกวัต เกิดบ้านชั้น. 2549. **การประยุกต์ใช้ Phase Change Material ในการพัฒนาภาชนะเก็บกักความร้อน**. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

คณะกรรมการวิชาการสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2544. **การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต**. ครั้งที่ 1. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

ทิพย์รัตน์ หาญสืบสาย. 2544. **เถ้าลอยลิกไนต์ในงานคอนกรีตกับการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม**. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

ปริญญญา จินดาประเสริฐ และ อินทรชัย หอวิจิตร. 2528. **การศึกษาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ**. สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชนบท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

Banu, D., D. Feldman, F. Haghighat, J. Paris and D. Hawes. 1998. **Energy Storing Wallboard: Flammability Tests**. J Mater Civ Eng. 10: 98–105.

Chahroudi, D. 1976. **Thermocrete heat storage materials: applications and performance specifications**. Proceedings of Sharing the Sun Solar Technology in the Seventies Conference, Winnipeg, USA.

Dong, Z. 2004. **Development of thermal energy storage concrete**. Cement and Concrete Research. 34: 927-934.

Farid, M.M. and W.J. Kong. 2001. **Underfloor heating with latent heat storage**. Proc Instn Mech Engrs. 215: 601–9.

- Feldman, D. and D. Banu. 1991. **Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard.** Solar Energy Mater. 22: 231–242.
- Feldman, D. and D. Banu. 1996. **DSC analysis for the evaluation of an energy storing wallboard.** Thermochimica acta. 272: 243-215
- Hadjieva, M., R. Stoykov and T. Filipova. 2000. **Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage.** Renew Energy. 19: 111–5.
- Hawes, D. W., D. Banu and D. Feldman. 1990. **Latent heat storage in concrete II.** Solar Energy Mater. 21: 61–80.
- Hawlader, M. N. A., M. S. Uddin and Mya Mya Khin. 2003. **Microencapsulated PCM thermal-energy storage system.** Applied Energy. 74: 195-202
- Inaba, H. and P. Tu. 1997. **Evaluation of Thermophysical Characteristics on Shape-Stabilized Paraffin as a Solid-Liquid Phase Change Material.** Heat and Mass Transfer. 32: 307-312.
- Lee, T., D.W. Hawes, D. Banu and D. Feldman. 2000. **Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete.** Solar Energy Mater Solar Cells. 62: 217–37.
- Liu, X., H. Liu, S. Wang, L. Zhang and H. Cheng. 2006. **Preparation and Thermal Properties of Form Stable Paraffin Phase Change Materials Encapsulation.** Energy Conversion and Management. 47: 2515–2522.
- Peippo, K and P. Kauranen. 1991. **A Multi Component PCM Wall Optimized for Passive Solar Heating.** Energy and Buildings. 17: 259 – 270.

- Schossiga, P., H.-M. Henninga and S. Gschwander. 2005. **Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials.** *Solar Energy Materials & Solar Cells.* 89: 297–306
- Xiao, M., B. Feng and K. Gong. 2001. **Thermal Performance of a High Conductive Shape-Stabilized Thermal Storage Material.** *Solar Energy Materials & Solar Cells.* 69: 293–296.
- Xiaoming, F. and Z. Zhengguo. 2006. **A Novel Montmorillonite Based Composite Phase Change Materials and Its Applications in Thermal Storage Building Materials.** *Energy and Buildings.* 38: 377–380.
- Zhengguo Z. and F. Xiaoming. 2006. **Study on Paraffin / Expanded Graphite Composite Phase Change Thermal Energy Storage Material.** *Energy Conservation and Management.* 47: 303–310.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

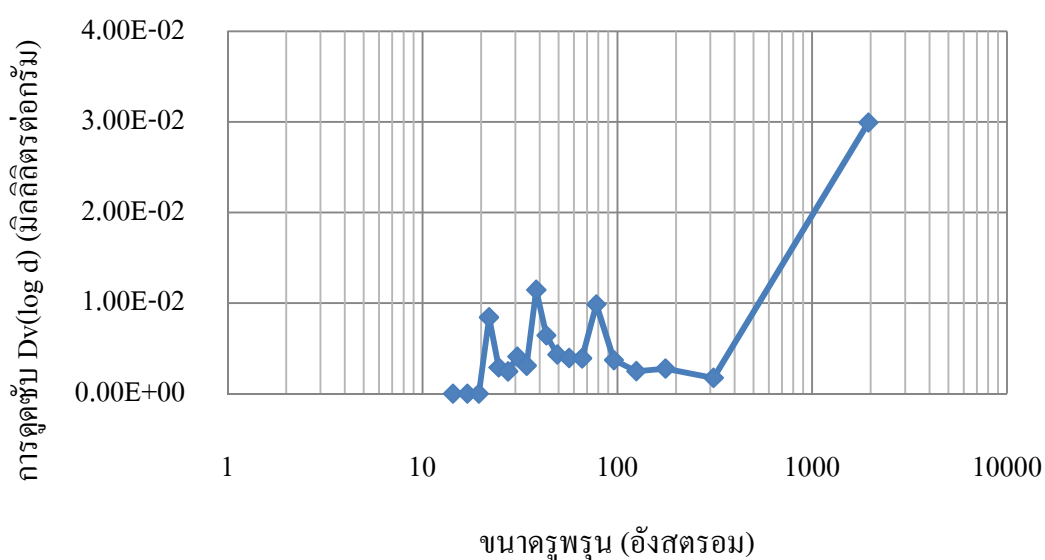
ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่าง

1. ข้อมูลการหาปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิวของถ้ำลอย

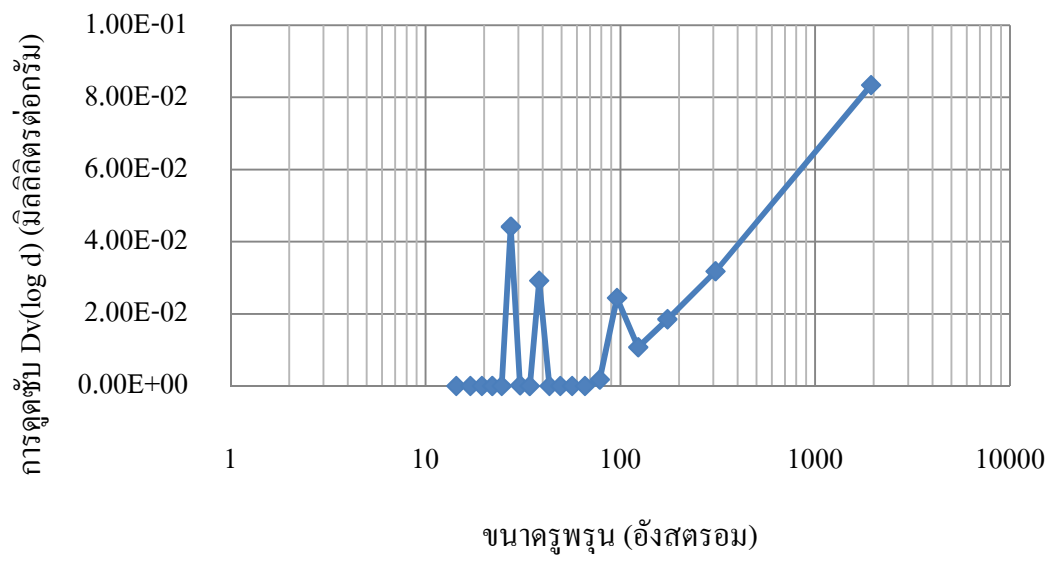
ผลการหาปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิวของถ้ำลอย 2 แหล่ง คือ ถ้ำลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะและโรงงานไฟฟ้า BLCP ตรวจวัดด้วยเครื่อง Nitrogen Adsorption รุ่น Autosorb1 แสดงดังนี้

ตารางผนวกที่ ก1 ข้อมูลพื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุนและปริมาตรรูพรุนของถ้ำลอย

ถ้ำลอย	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (อังสตรอม)	ปริมาตรรูพรุน (มิลลิลิตรต่อกรัม)
แม่เมาะ	4.411	21.98	0.033
BLCP	9.313	27.44	0.097



ภาพผนวกที่ ก1 การกระจายขนาดรูพรุนของถ้ำลอยจากแม่เมาะ



ภาพผนวกที่ ก2 การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยจาก BLCP

2. ข้อมูลคุณสมบัติทางความร้อนที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC ของผลิตภัณฑ์

ผลการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะ จุดหลอมเหลว และค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวของสารทั้งหมด รวมถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลความร้อนกับอุณหภูมิ โดยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ยี่ห้อ TA INSTRUMENT รุ่น SDT 2860 และใช้อัตราเพิ่มอุณหภูมิที่ 1 องศาเซลเซียสต่อนาที แสดงดังนี้

ตารางผนวกที่ ก2 ความดันสุญญากาศและสถานะต่างๆที่ใช้ในการทดลองและคุณสมบัติทางความร้อนของสารตัวอย่าง

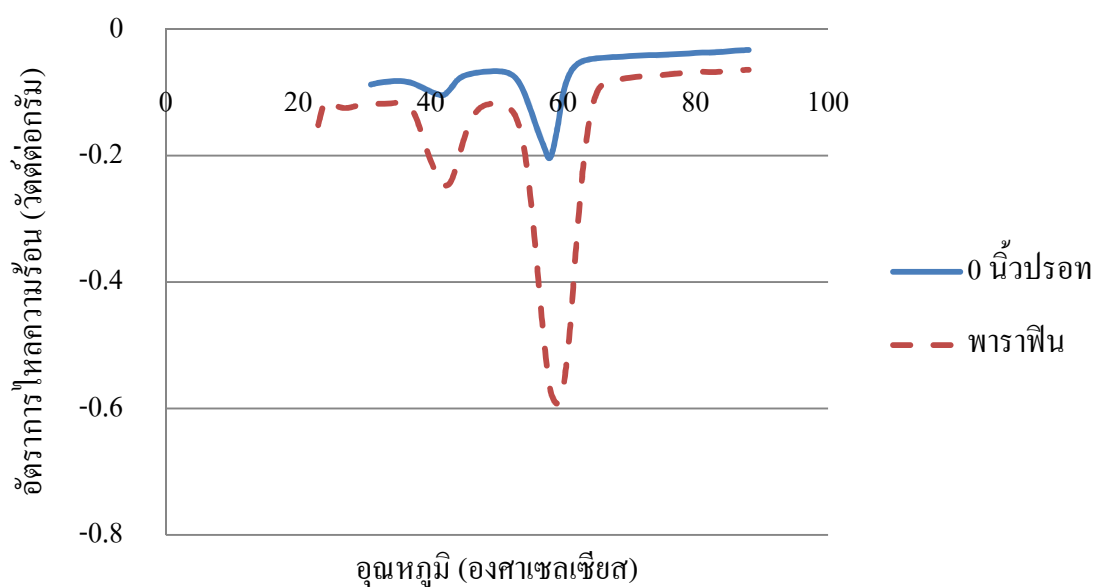
ความดัน สุญญากาศ (นิ้วปรอท)	เวลา สุญญากาศ (นาที)	เวลาการแช่ ถ้ำลอย (นาที)	อุณหภูมิ พาราฟิน (°C)	จุดหลอมเหลว พาราฟิน (°C)	ความร้อน แฝง (จูลต่อกรัม)
0	30	30	90	58.19	39.89
10	30	30	90	58.93	56.70
20	30	30	90	58.96	58.23
30	30	30	90	58.88	60.56
40	30	30	90	58.53	61.12
50	30	30	90	58.65	61.32

ตารางผนวกที่ ก3 เวลาในการแช่ถ้ำลอยในพาราฟินและสถานะต่างๆที่ใช้ในการทดลองและคุณสมบัติทางความร้อนของสารตัวอย่าง

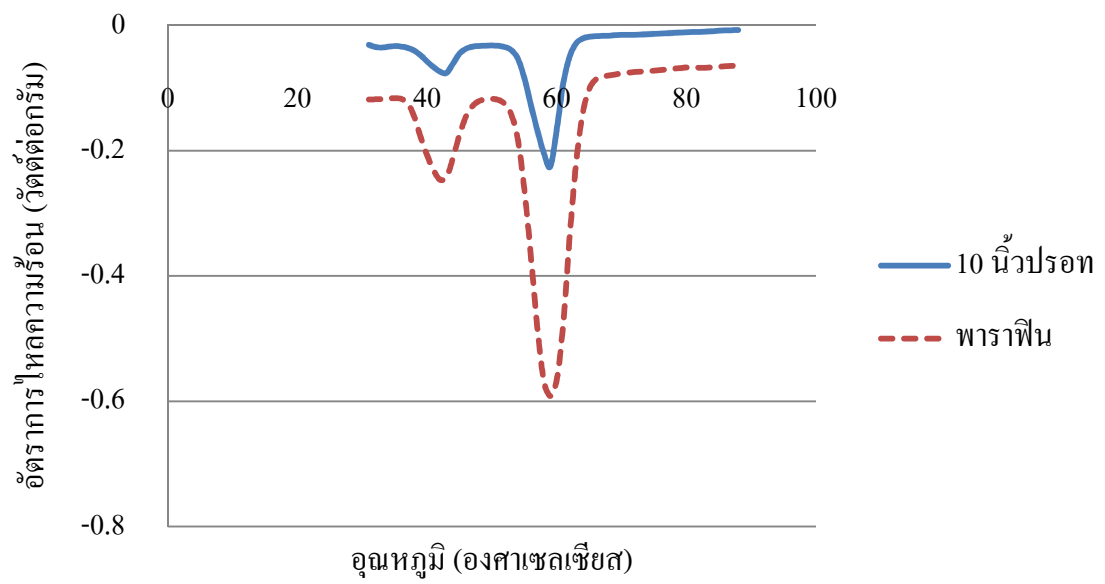
เวลาการแช่ ถ้ำลอย (นาที)	เวลา สุญญากาศ (นาที)	ความดัน สุญญากาศ (นิ้วปรอท)	อุณหภูมิ พาราฟิน (°C)	จุดหลอมเหลว พาราฟิน (°C)	ความร้อนแฝง (จูลต่อกรัม)
5	30	30	90	58.90	58.46
15	30	30	90	58.61	59.02
30	30	30	90	58.88	60.57
60	30	30	90	58.77	62.24

ตารางผนวกที่ ก4 อุณหภูมิของพาราฟินและสภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดลองและคุณสมบัติทางความร้อนของสารตัวอย่าง

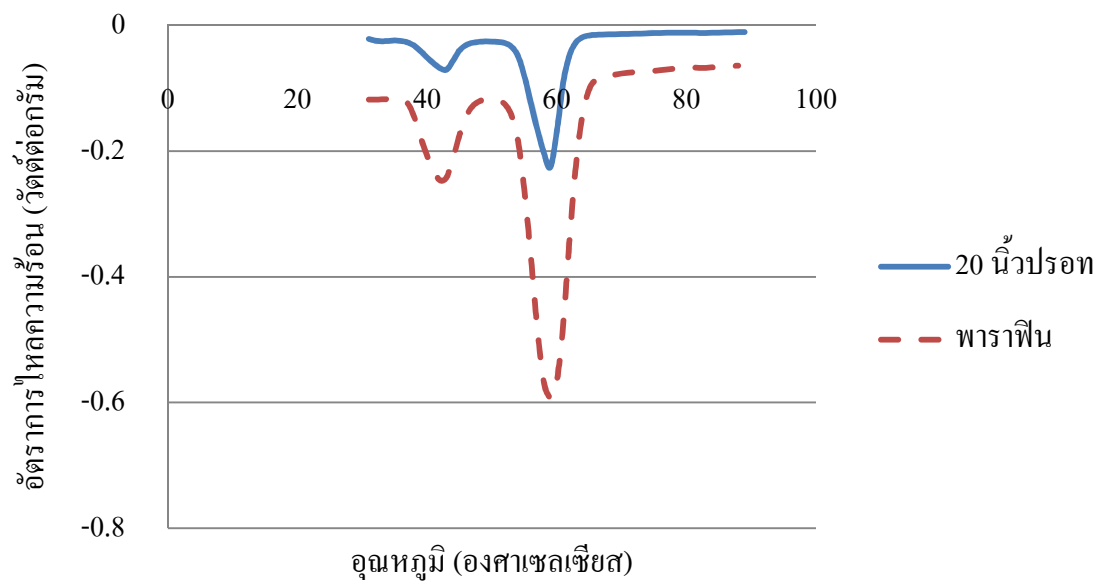
อุณหภูมิ พาราฟิน (°C)	เวลา สุญญากาศ (นาทึ)	ความดัน สุญญากาศ (นิ้วปรอท)	เวลาการแช่ เกลือ (นาทึ)	จุดหลอมเหลว พาราฟิน (°C)	ความร้อนแฝง (จูลต่อกรัม)
65	30	30	30	58.61	59.11
90	30	30	30	58.88	60.51
130	30	30	30	58.54	62.54



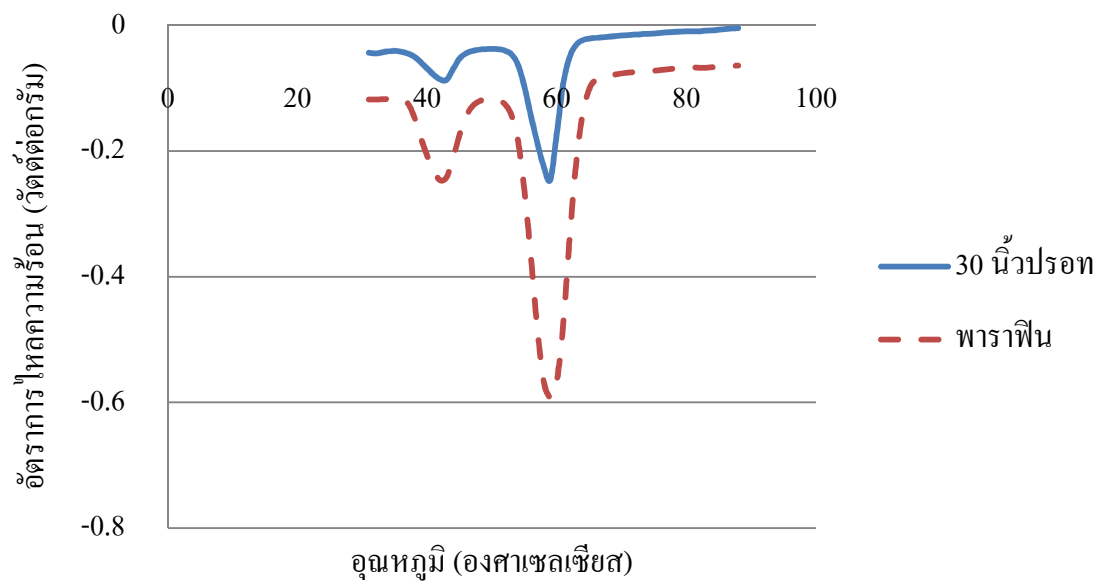
ภาพผนวกที่ ก3 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 0 นิ้วปรอท



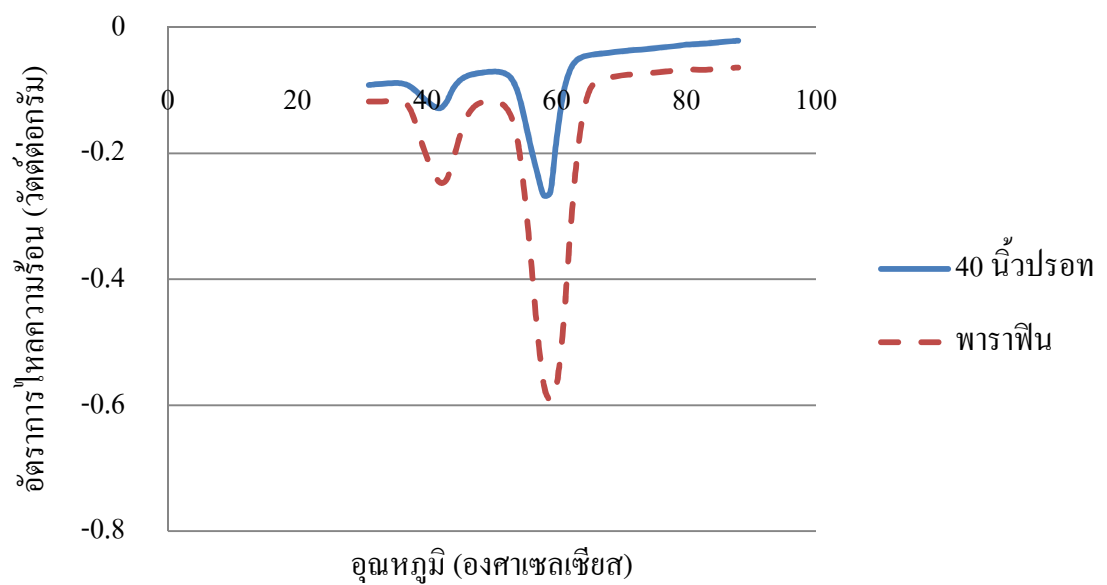
ภาพผนวกที่ ก4 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 10 นิ้วปรอท



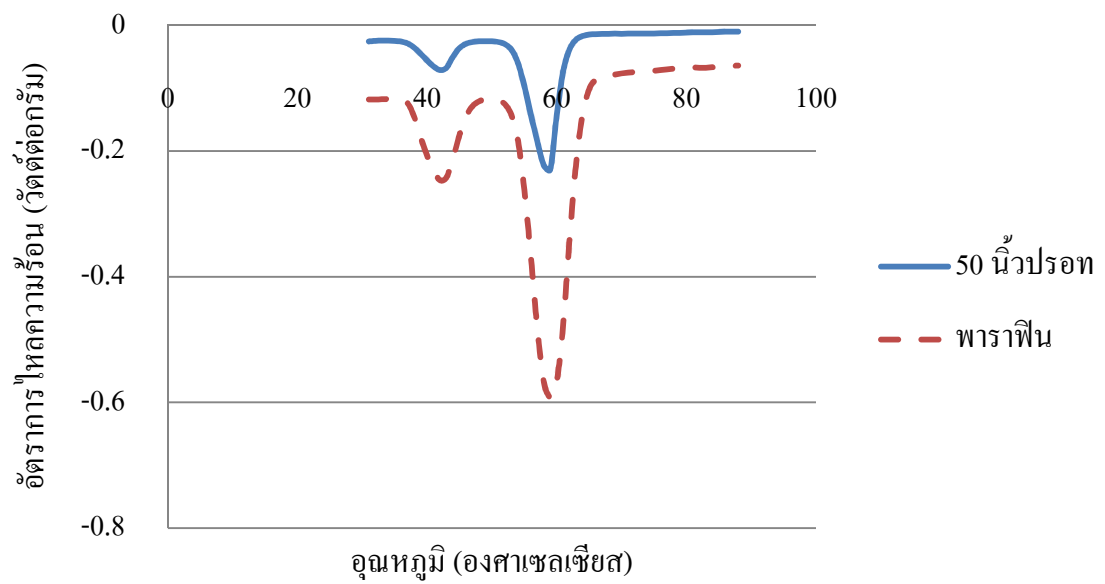
ภาพผนวกที่ ก5 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 20 นิ้วปรอท



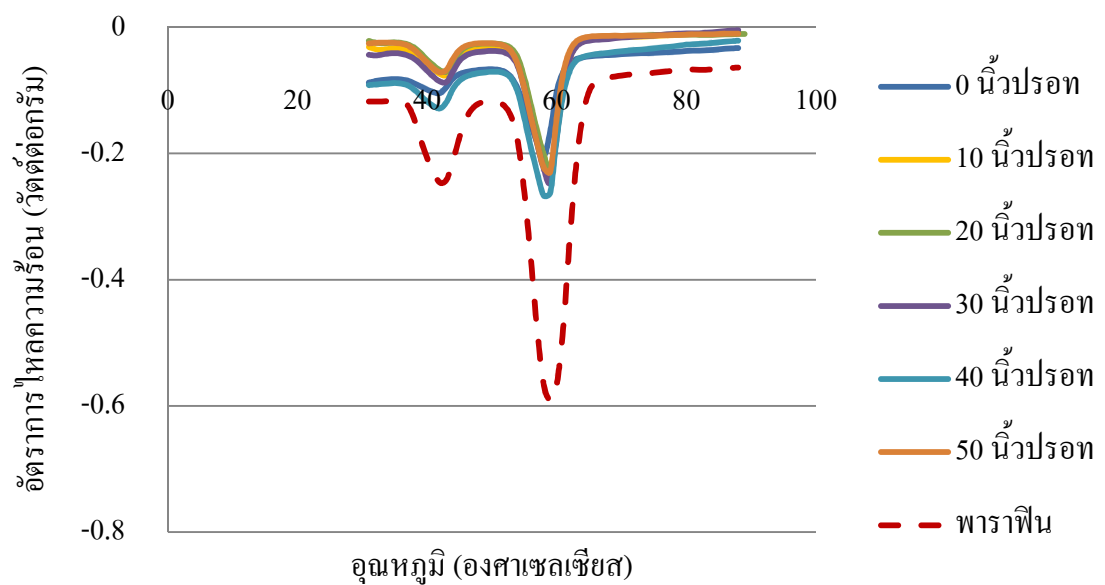
ภาพผนวกที่ 6 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 30 นิ้วปรอท



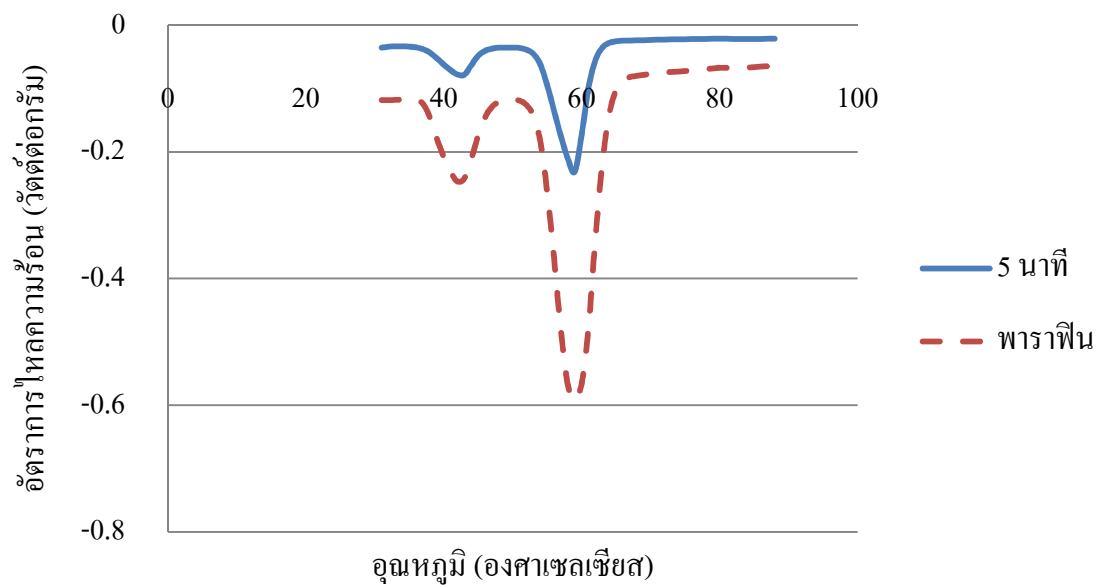
ภาพผนวกที่ 7 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 40 นิ้วปรอท



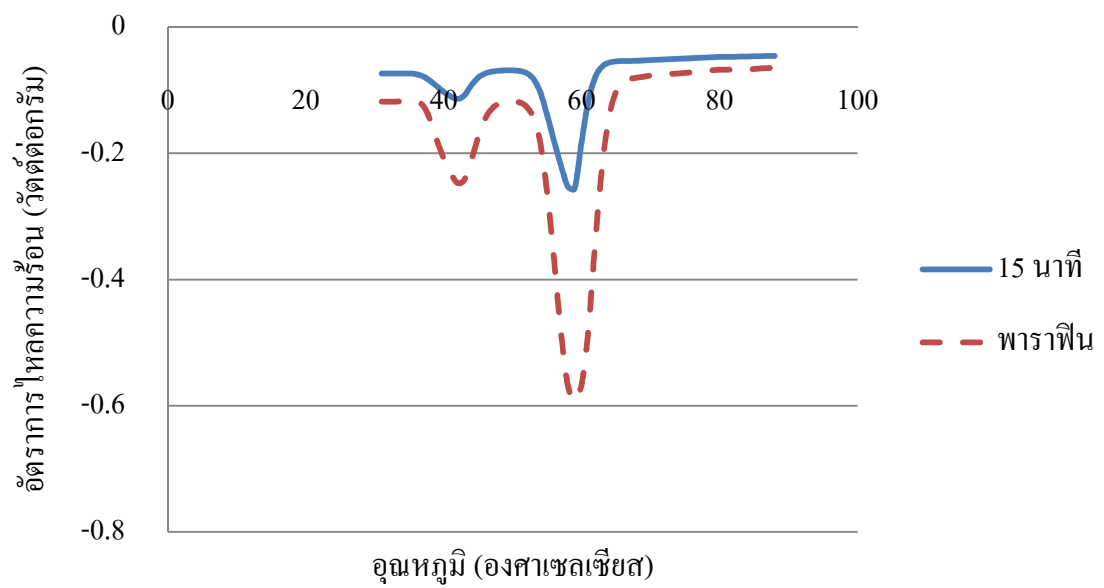
ภาพผนวกที่ ก8 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศ 50 นีว้ปรอท



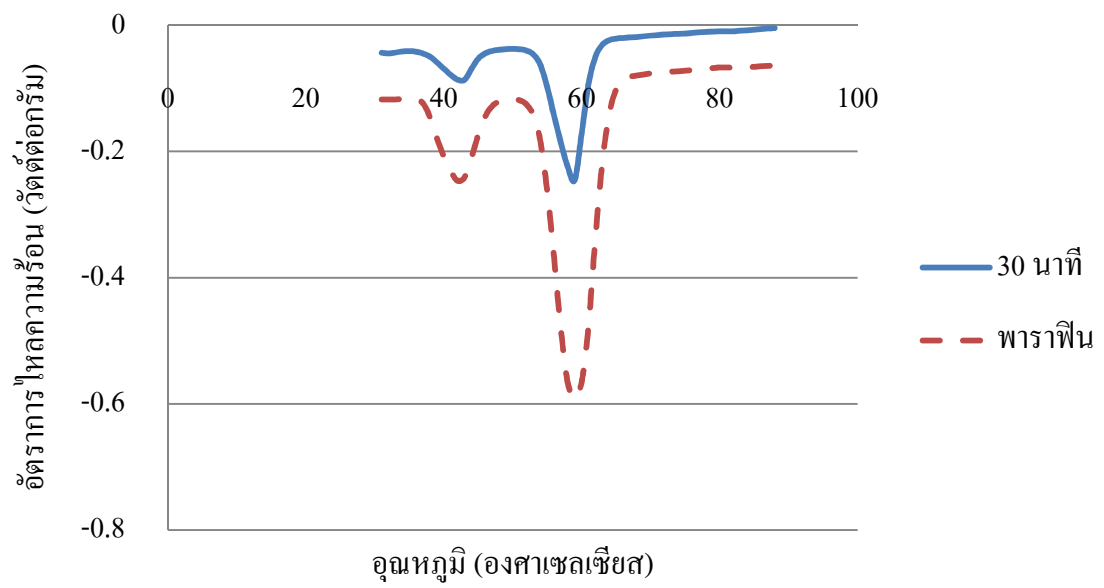
ภาพผนวกที่ ก9 กราฟ DSC ที่ความดันสุญญากาศต่างๆ



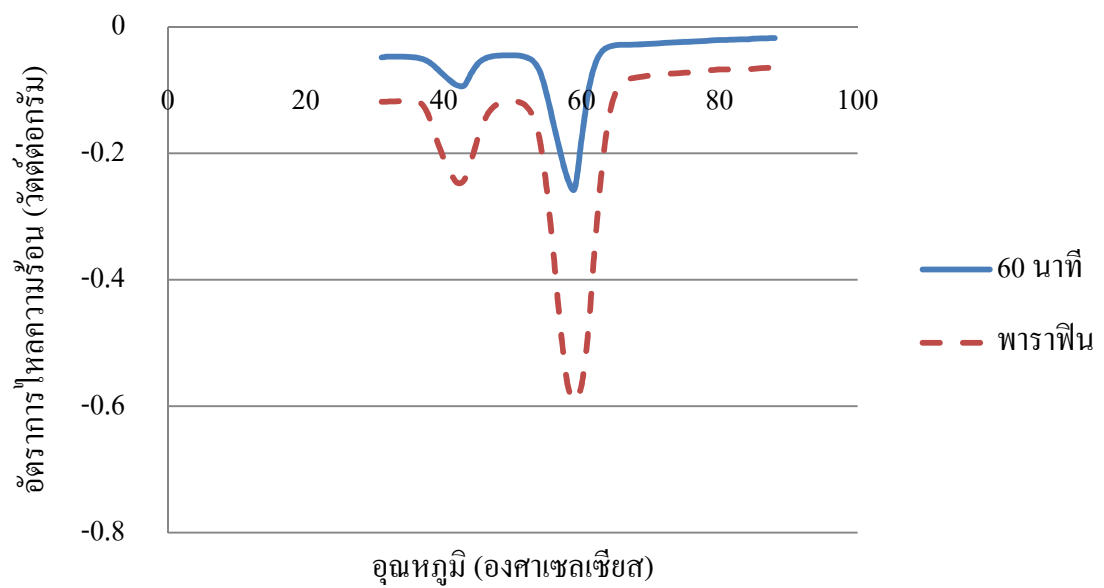
ภาพผนวกที่ ก10 กราฟ DSC ที่เวลาการแช่พาราฟิน 5 นาที



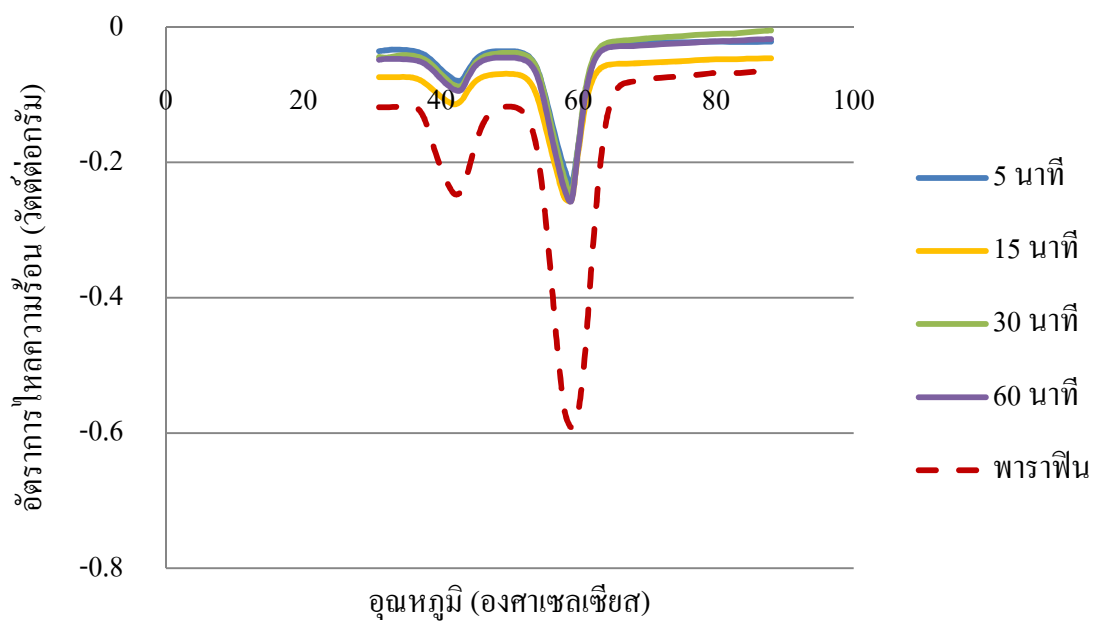
ภาพผนวกที่ ก11 กราฟ DSC ที่เวลาการแช่พาราฟิน 15 นาที



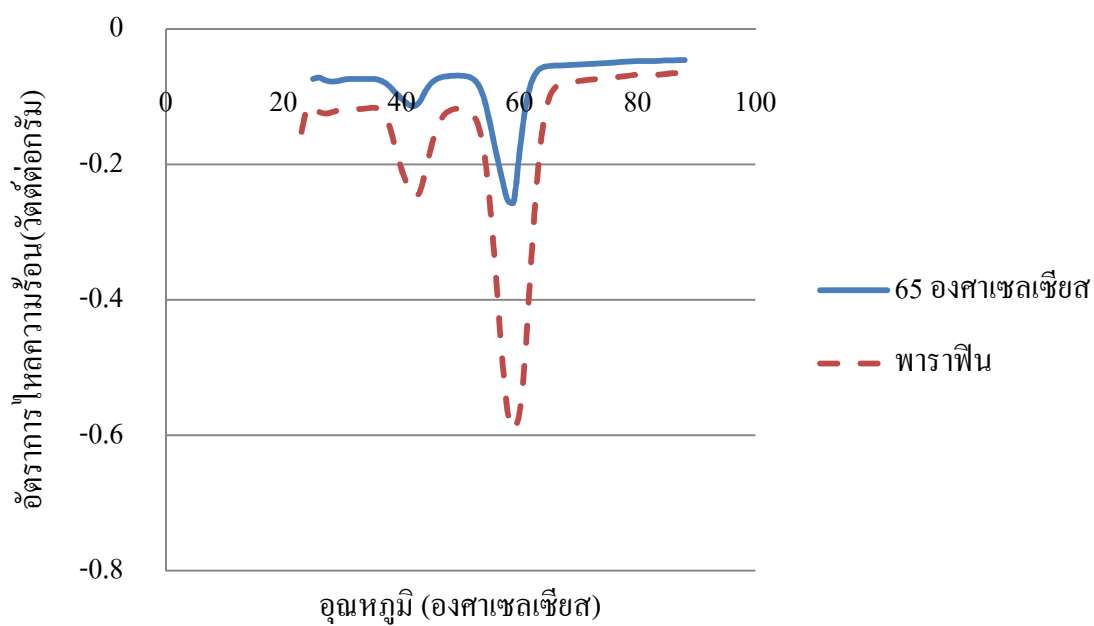
ภาพผนวกที่ ก12 กราฟ DSC ที่เวลาการแช่พาราฟิน 30 นาที



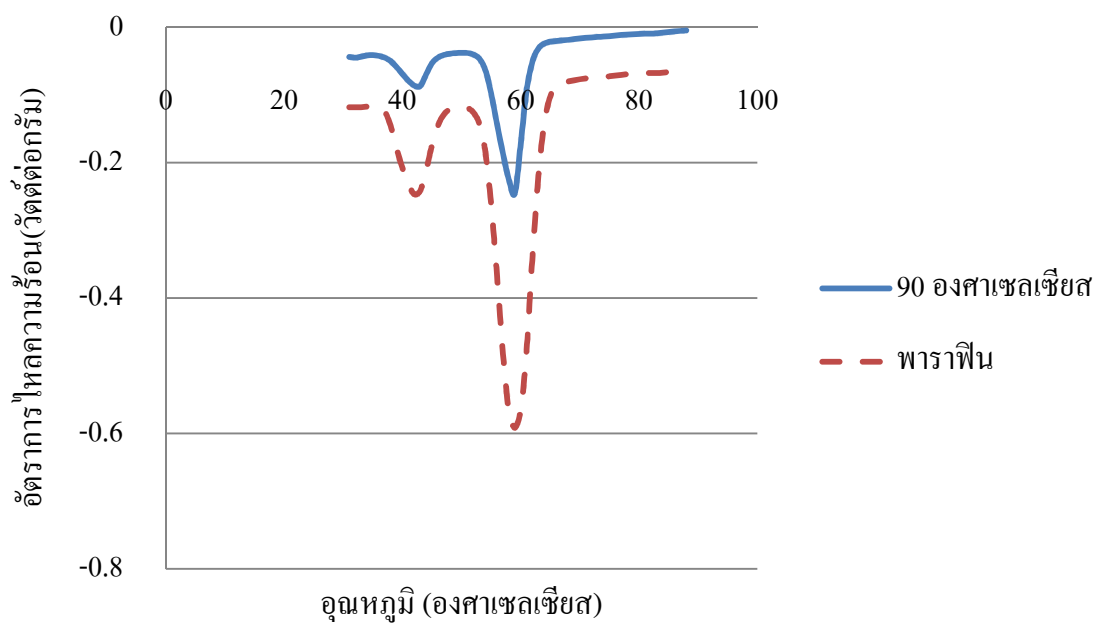
ภาพผนวกที่ ก13 กราฟ DSC ที่เวลาการแช่พาราฟิน 60 นาที



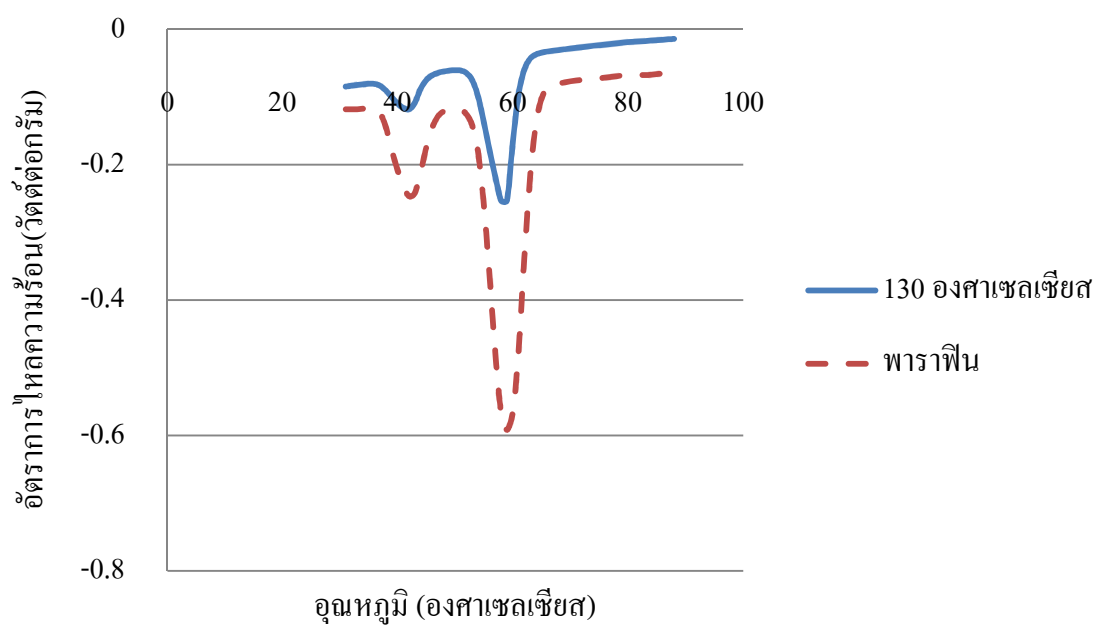
ภาพผนวกที่ ก14 กราฟ DSC ที่เวลาการแช่พาราฟินต่างๆ



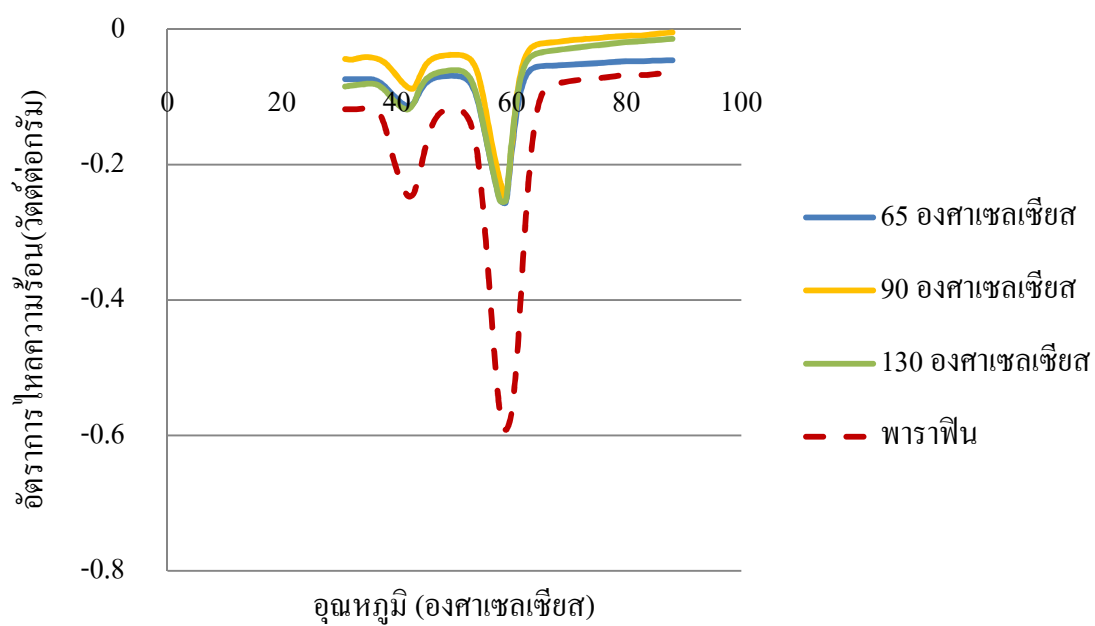
ภาพผนวกที่ ก15 กราฟ DSC ที่อุณหภูมิพาราฟิน 65 องศาเซลเซียส



ภาพผนวกที่ ก16 กราฟ DSC ที่อุณหภูมิพาราฟิน 90 องศาเซลเซียส



ภาพผนวกที่ ก17 กราฟ DSC ที่อุณหภูมิพาราฟิน 130 องศาเซลเซียส



ภาพผนวกที่ ก18 กราฟ DSC ที่อุณหภูมิพาราฟินต่างๆ

3. ข้อมูลทดสอบประสิทธิภาพด้านความแข็งแรง

ผลการทดสอบแรงอัด เพื่อหาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ โดยเครื่องทดสอบแรงอัด Versa Tester ทำการกดอัดสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร ที่เวลาการบ่มน้ำ 1, 3, 7, 28 วัน จากนั้นนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในหน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรกับเวลาบ่มน้ำในหน่วยวัน แสดงดังนี้

ตารางผนวกที่ ก5 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่อัตราส่วนต่างๆ

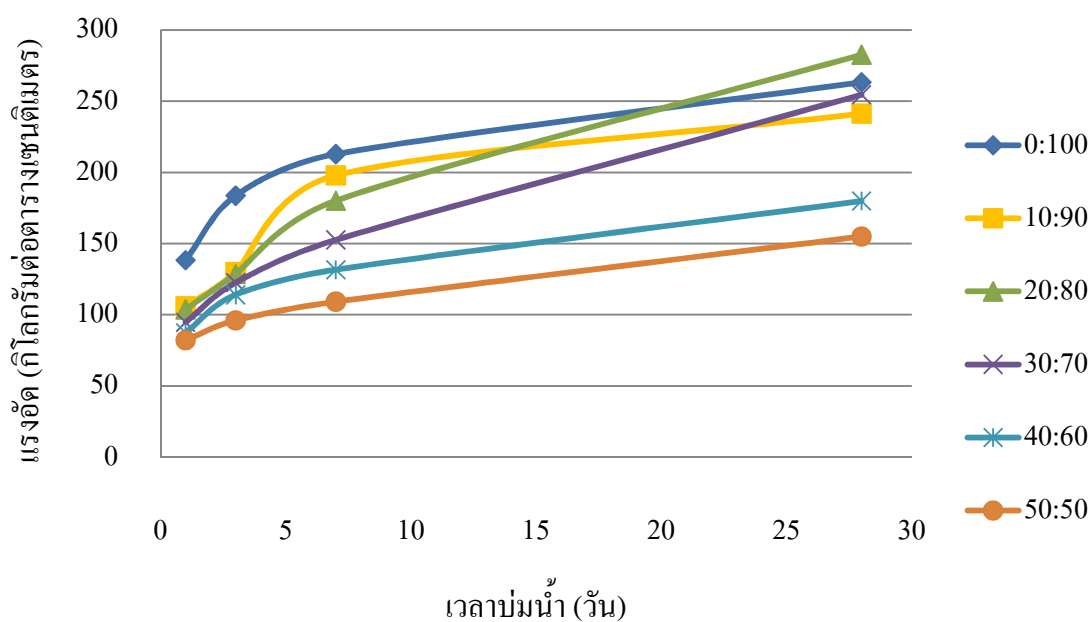
แม่เมาะ : ปูน	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน
0 : 100	138.4	183.7	212.9	263.3
10 : 90	106.0	130.1	197.9	241.3
20 : 80	103.7	128.6	180.1	282.6
30 : 70	94.8	122.6	152.7	254.6
40 : 60	87.4	114.0	131.6	179.8
50 : 50	82.1	96.0	109.2	155.0

ตารางผนวกที่ ก6 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย BLCP ที่อัตราส่วนต่างๆ

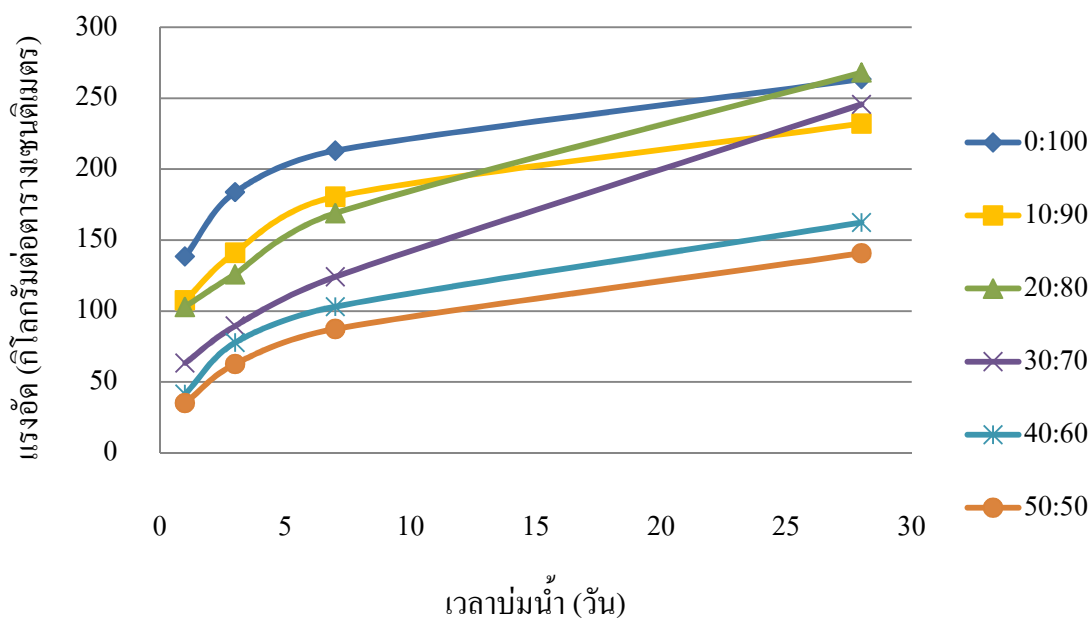
BLCP : ปูน	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน
0 : 100	138.4	183.7	212.9	263.3
10 : 90	107.5	141.0	180.5	232.0
20 : 80	102.9	125.9	168.9	268.0
30 : 70	63.3	89.4	124.1	245.6
40 : 60	41.4	77.7	103.0	162.3
50 : 50	35.1	62.6	87.3	140.6

ตารางผนวกที่ ก7 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสม PCMs ที่อัตราส่วนต่างๆ

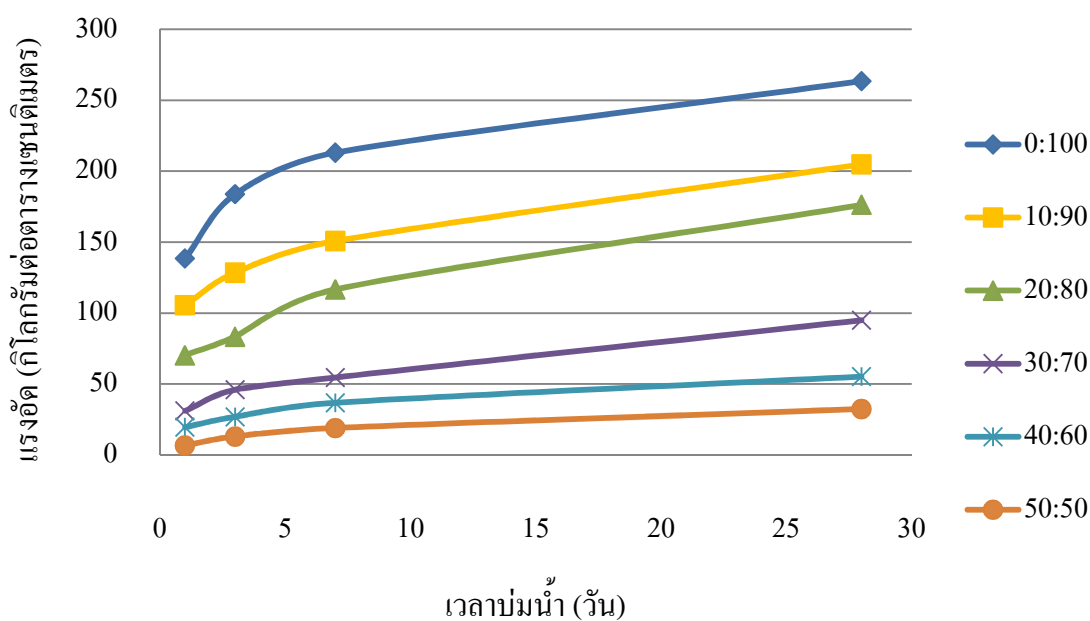
PCMs : ปูน	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน
0 : 100	138.4	183.7	212.9	263.3
10 : 90	105.5	128.4	150.7	204.7
20 : 80	70.2	83.3	116.6	176.2
30 : 70	31.0	45.9	54.5	94.8
40 : 60	19.5	26.8	36.7	55.2
50 : 50	6.6	12.9	18.9	32.3



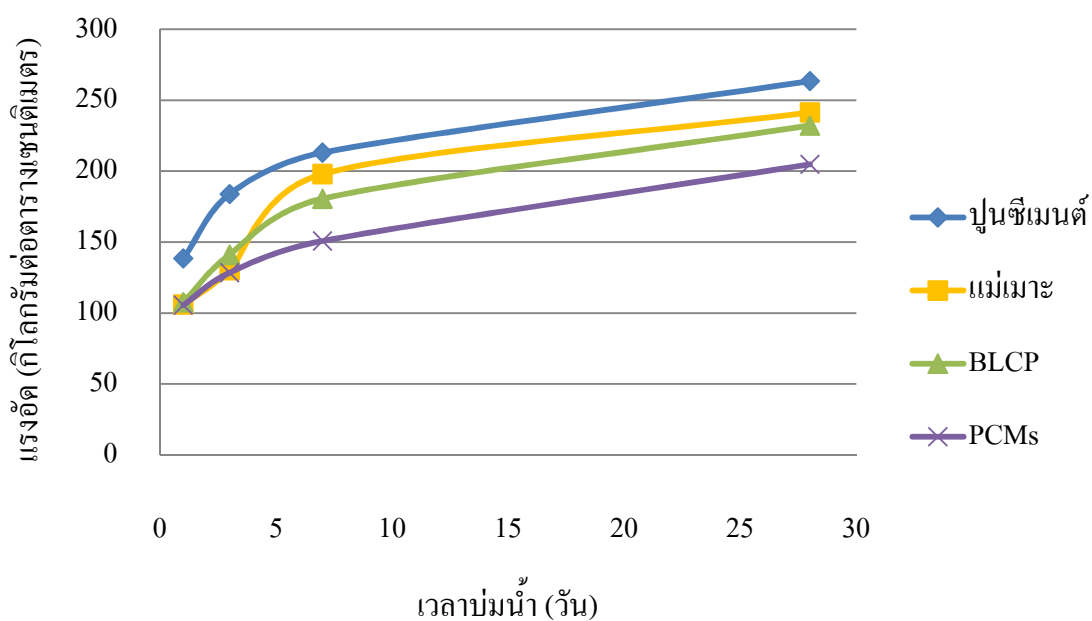
ภาพผนวกที่ ก19 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่อัตราส่วนต่างๆ



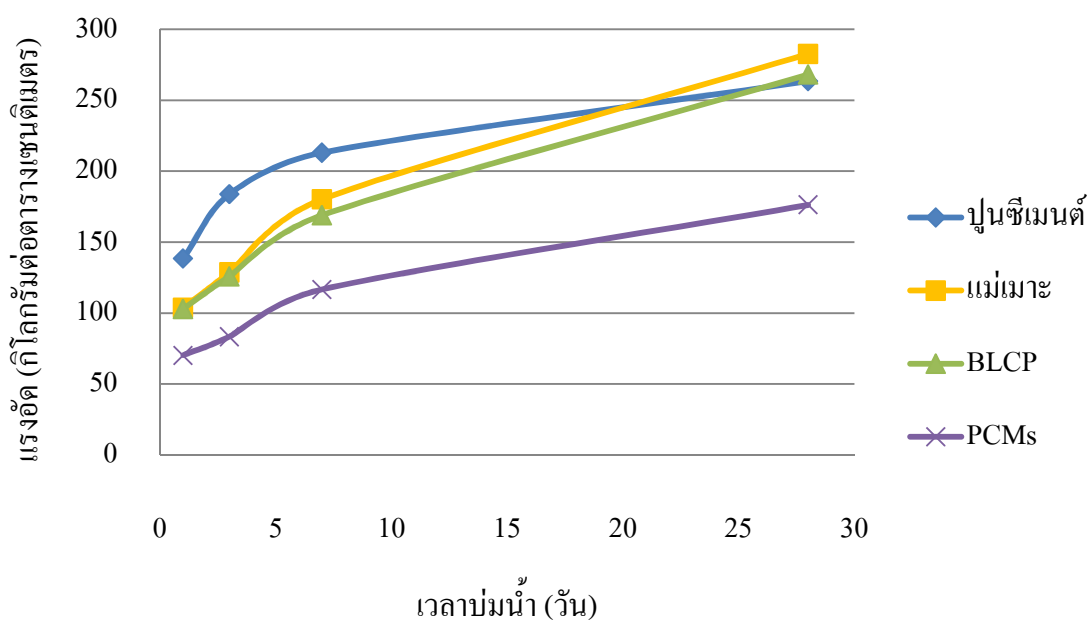
ภาพผนวกที่ ก20 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเกลาลอย BLCP ที่อัตราส่วนต่างๆ



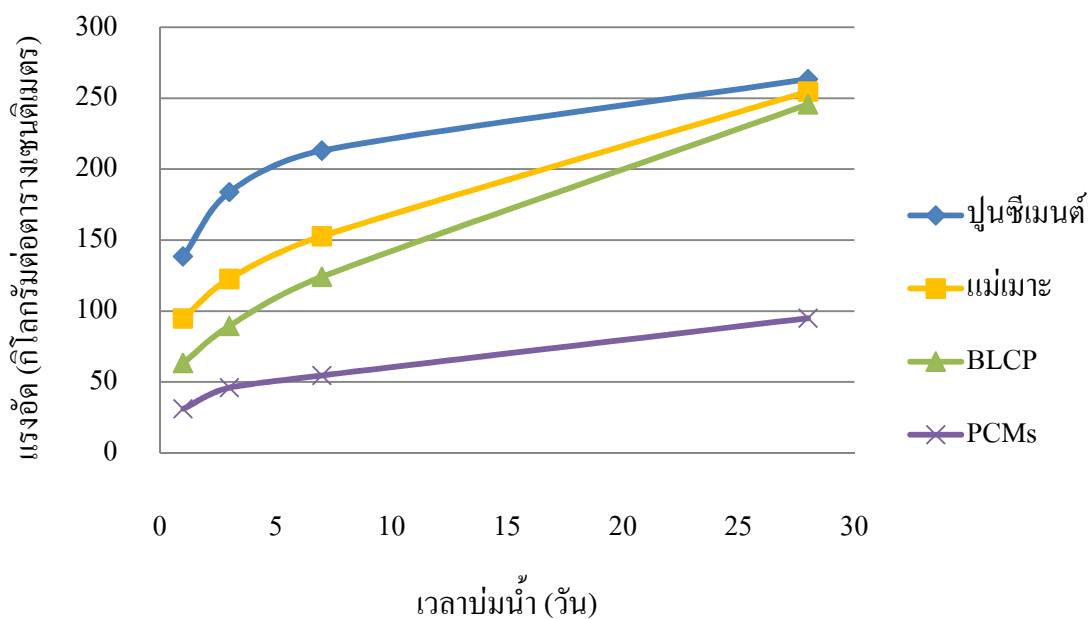
ภาพผนวกที่ ก21 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสม PCMs ที่อัตราส่วนต่างๆ



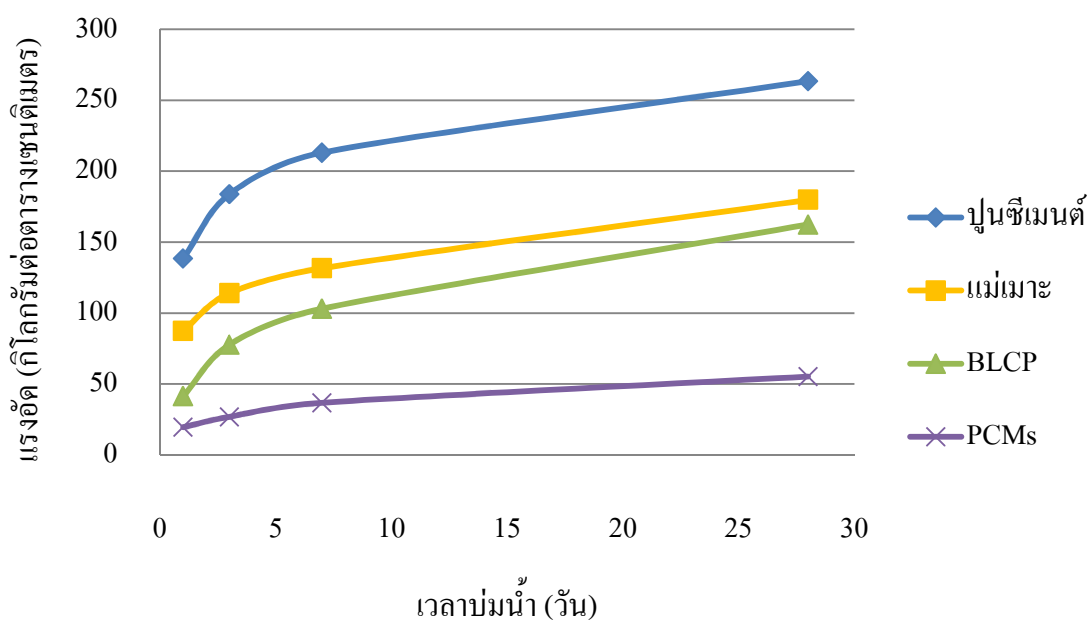
ภาพผนวกที่ ก22 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน 10:90



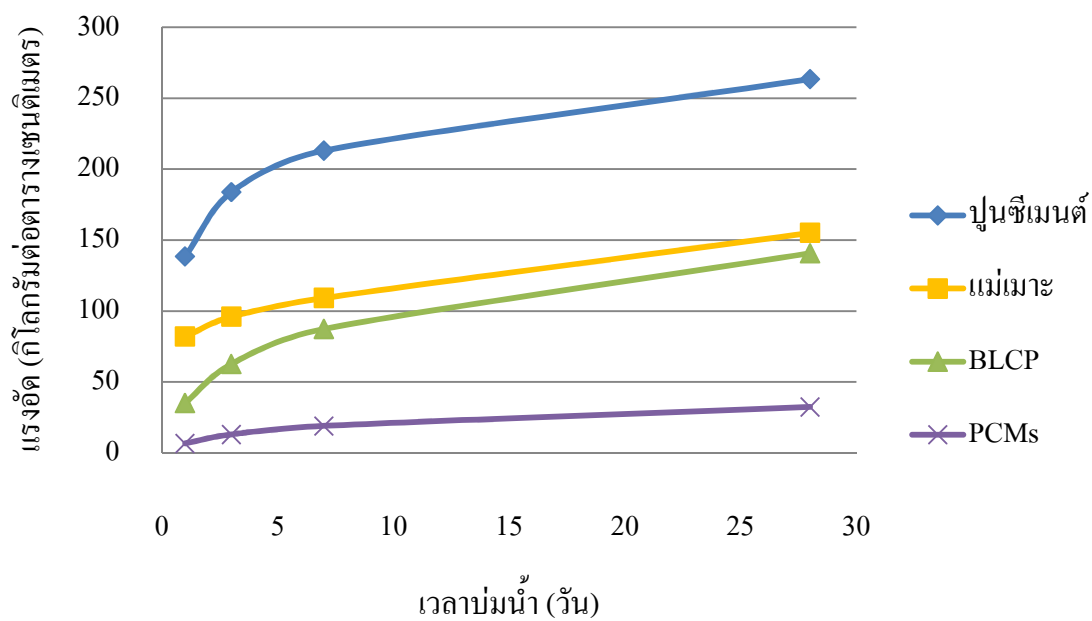
ภาพผนวกที่ ก23 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน 20:80



ภาพผนวกที่ ก24 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน 30:70



ภาพผนวกที่ ก25 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน 40:60



ภาพผนวกที่ ก26 กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน 50:50

ภาคผนวก ข

ข้อมูลสมบัติทางกลศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบแรงกดของผลิตภัณฑ์

ตารางผนวกที่ ข1 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์

เวลาในการ บ่มน้ำ	ก้อนที่	แรงอัด (kg)	ขนาด (cm ²)	กำลังอัด (kg/cm ²)	กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm ²)
1	1	3,450	26.47	130.3	138.4
	2	3,750	25.91	144.7	
	3	3,700	26.42	140.0	
3	1	5,150	26.37	195.3	183.7
	2	4,825	26.27	183.7	
	3	4,575	26.57	172.2	
7	1	5,450	27.89	201.2	212.9
	2	5,825	27.46	212.2	
	3	6,150	27.30	225.3	
28	1	7,275	26.10	278.7	263.3
	2	6,750	26.30	256.5	
	3	6,625	26.00	254.7	

ตารางผนวกที่ ข2 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่
อัตราส่วน 10 : 90

เวลาในการ บ่มน้ำ	ก้อนที่	แรงอัด (kg)	ขนาด (cm ²)	กำลังอัด (kg/cm ²)	กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm ²)
1	1	2,820	25.91	108.8	106.0
	2	2,780	26.06	106.7	
	3	2,755	26.88	102.5	
3	1	3,425	25.40	134.8	130.1
	2	3,250	25.91	125.4	
	3	3,325	25.60	129.9	
7	1	5,050	25.70	196.5	197.9
	2	4,900	25.65	191.0	
	3	5,300	25.70	206.2	
28	1	6,200	26.27	236.1	241.3
	2	6,275	24.89	252.1	
	3	6,000	25.45	235.8	

ตารางผนวกที่ ข3 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่
อัตราส่วน 20 : 80

เวลาในการ บ่มน้ำ	ก้อนที่	แรงอัด (kg)	ขนาด (cm ²)	กำลังอัด (kg/cm ²)	กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm ²)
1	1	2,680	25.80	103.9	103.7
	2	2,705	25.65	105.4	
	3	2,640	25.91	101.9	
3	1	3,225	25.40	127.0	128.6
	2	3,400	25.96	131.0	
	3	3,275	25.60	127.9	
7	1	4,525	25.55	177.1	180.1
	2	4,700	25.60	183.6	
	3	4,575	25.45	179.8	
28	1	7,525	25.90	280.8	282.6
	2	7,150	25.55	279.8	
	3	7,425	25.86	287.2	

ตารางผนวกที่ ข4 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่อัตราส่วน 30 : 70

เวลาในการ บ่มน้ำ	ก้อนที่	แรงอัด (kg)	ขนาด (cm ²)	กำลังอัด (kg/cm ²)	กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm ²)
1	1	2,525	26.78	94.3	94.8
	2	2,490	26.32	94.6	
	3	2,450	25.65	95.5	
3	1	3,425	26.52	129.1	122.6
	2	3,300	26.01	126.9	
	3	2,950	26.36	111.9	
7	1	4,175	25.63	162.7	152.7
	2	3,900	26.73	145.9	
	3	3,950	26.41	149.6	
28	1	6,550	26.37	248.4	254.6
	2	6,625	25.09	264.1	
	3	6,600	26.26	251.3	

ตารางผนวกที่ ข5 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่
อัตราส่วน 40 : 60

เวลาในการ บ่มน้ำ	ก้อนที่	แรงอัด (kg)	ขนาด (cm ²)	กำลังอัด (kg/cm ²)	กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm ²)
1	1	2,300	26.27	87.6	87.4
	2	2,325	25.81	90.1	
	3	2,225	26.36	84.4	
3	1	3,000	25.55	117.4	114.0
	2	2,925	25.60	114.2	
	3	2,875	25.05	110.4	
7	1	3,425	25.96	131.9	131.6
	2	3,275	26.05	125.7	
	3	3,525	25.70	137.1	
28	1	4,625	25.65	180.3	179.8
	2	4,750	25.65	185.2	
	3	4,500	25.86	174.0	

ตารางผนวกที่ ข6 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่
อัตราส่วน 50 : 50

เวลาในการ บ่มน้ำ	ก้อนที่	แรงอัด (kg)	ขนาด (cm ²)	กำลังอัด (kg/cm ²)	กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm ²)
1	1	2,155	26.57	81.1	82.1
	2	2,120	25.96	81.7	
	3	2,190	26.26	83.4	
3	1	2,485	26.52	93.7	96.0
	2	2,700	27.14	99.5	
	3	2,525	26.63	94.8	
7	1	2,875	26.52	108.4	109.2
	2	2,815	25.81	109.1	
	3	2,900	26.32	110.2	
28	1	4,050	26.20	154.5	155.0
	2	4,075	25.90	157.3	
	3	3,900	25.40	153.2	

ตารางผนวกที่ ข7 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย BLCP ที่อัตราส่วน 10 : 90

เวลาในการ บ่มน้ำ	ก้อนที่	แรงอัด (kg)	ขนาด (cm ²)	กำลังอัด (kg/cm ²)	กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm ²)
1	1	2,835	26.42	107.3	107.5
	2	2,790	25.29	110.3	
	3	2,835	27.04	104.9	
3	1	3,425	25.45	134.6	141.0
	2	3,650	25.24	144.6	
	3	3,650	25.40	143.7	
7	1	4,400	24.99	176.0	180.5
	2	4,825	27.19	177.4	
	3	5,075	26.98	188.1	
28	1	5,875	26.41	222.4	232
	2	6,150	26.62	231.0	
	3	6,025	24.85	242.5	

ตารางผนวกที่ ข8 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย BLCP ที่อัตราส่วน 20 : 80

เวลาในการ บ่มน้ำ	ก้อนที่	แรงอัด (kg)	ขนาด (cm ²)	กำลังอัด (kg/cm ²)	กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm ²)
1	1	2,685	26.16	102.6	102.9
	2	2,690	26.01	103.4	
	3	2,675	26.06	102.7	
3	1	3,225	25.91	124.5	125.9
	2	3,200	26.37	121.4	
	3	3,525	26.73	131.9	
7	1	4,400	25.81	170.5	168.9
	2	4,250	25.96	163.7	
	3	4,500	26.11	172.3	
28	1	7,000	25.60	273.4	268.0
	2	6,850	25.81	265.4	
	3	6,950	26.21	265.1	

ตารางผนวกที่ ข9 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย BLCP ที่อัตราส่วน 30 : 70

เวลาในการ บ่มน้ำ	ก้อนที่	แรงอัด (kg)	ขนาด (cm ²)	กำลังอัด (kg/cm ²)	กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm ²)
1	1	1,755	26.32	66.7	63.3
	2	1,555	25.60	60.7	
	3	1,680	26.83	62.6	
3	1	2,300	27.08	84.9	89.4
	2	2,460	26.27	93.7	
	3	2,380	26.57	89.6	
7	1	3,125	25.90	120.6	124.1
	2	3,250	26.11	124.5	
	3	3,425	26.94	127.2	
28	1	6,300	25.96	242.7	245.6
	2	6,300	25.35	248.5	
	3	6,350	25.86	245.6	

ตารางผนวกที่ ข10 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย BLCP ที่อัตราส่วน 40 : 60

เวลาในการ บ่มน้ำ	ก้อนที่	แรงอัด (kg)	ขนาด (cm ²)	กำลังอัด (kg/cm ²)	กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm ²)
1	1	1,130	26.83	42.1	41.4
	2	1,130	27.25	41.5	
	3	1,105	27.14	40.7	
3	1	2,100	27.14	77.4	77.7
	2	2,080	26.72	77.8	
	3	2,065	26.47	78.0	
7	1	2,765	26.68	103.6	103.0
	2	2,695	26.06	103.4	
	3	2,665	26.11	102.1	
28	1	4,200	26.88	156.2	162.3
	2	4,500	26.88	167.4	
	3	4,225	25.86	163.4	

ตารางผนวกที่ ข11 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ลูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย BLCP ที่อัตราส่วน 50 : 50

เวลาในการ บ่มน้ำ	ก้อนที่	แรงอัด (kg)	ขนาด (cm ²)	กำลังอัด (kg/cm ²)	กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm ²)
1	1	905	26.16	34.6	35.1
	2	940	27.09	34.7	
	3	965	26.88	35.9	
3	1	1,565	26.16	59.8	62.6
	2	1,615	26.32	61.4	
	3	1,715	25.70	66.7	
7	1	2,260	26.26	86.1	87.3
	2	2,360	26.16	90.2	
	3	2,200	25.65	85.8	
28	1	3,500	25.80	135.6	140.6
	2	3,700	26.60	139.2	
	3	3,775	25.70	146.9	

ตารางผนวกที่ ข12 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ถูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสม PCMs ที่อัตราส่วน 10 : 90

เวลาในการ ปั้มน้ำ	ก้อนที่	แรงอัด (kg)	ขนาด (cm ²)	กำลังอัด (kg/cm ²)	กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm ²)
1	1	2,810	25.75	109.1	105.5
	2	2,785	26.78	104.0	
	3	2,815	27.19	103.5	
3	1	3,275	25.19	130.0	128.4
	2	3,125	25.95	120.4	
	3	3,550	26.36	134.7	
7	1	4,250	26.26	161.8	150.7
	2	3,925	26.57	147.7	
	3	3,800	26.62	142.7	
28	1	5,300	25.50	207.8	204.7
	2	5,250	25.91	202.6	
	3	5,225	25.65	203.7	

ตารางผนวกที่ ข13 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ถูกบดกับปูนซีเมนต์ผสม PCMs ที่อัตราส่วน 20 : 80

เวลาในการ ปั้มน้ำ	ก้อนที่	แรงอัด (kg)	ขนาด (cm ²)	กำลังอัด (kg/cm ²)	กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm ²)
1	1	1,875	26.63	70.4	70.2
	2	1,800	26.57	67.7	
	3	1,920	26.47	72.5	
3	1	2,230	25.81	86.4	83.3
	2	2,015	26.32	76.6	
	3	2,320	26.68	87.0	
7	1	3,075	26.16	117.5	116.6
	2	3,025	25.45	118.9	
	3	2,975	26.21	113.5	
28	1	4,800	25.86	185.6	176.2
	2	4,525	26.06	173.6	
	3	4,450	26.27	169.4	

ตารางผนวกที่ ข14 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ถูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสม PCMs ที่อัตราส่วน 30 : 70

เวลาในการ ปั้มน้ำ	ก้อนที่	แรงอัด (kg)	ขนาด (cm ²)	กำลังอัด (kg/cm ²)	กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm ²)
1	1	800	26.37	30.3	31.0
	2	845	26.52	31.9	
	3	790	25.55	30.9	
3	1	1,180	26.47	44.6	45.9
	2	1,245	26.16	47.6	
	3	1,195	26.32	45.4	
7	1	1,515	26.11	58.0	54.5
	2	1,410	26.47	53.3	
	3	1,385	26.47	52.3	
28	1	2,445	25.65	95.3	94.8
	2	2,440	25.50	95.7	
	3	2,400	25.65	93.6	

ตารางผนวกที่ ข15 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ถูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสม PCMs ที่อัตราส่วน 40 : 60

เวลาในการ ปั้มน้ำ	ก้อนที่	แรงอัด (kg)	ขนาด (cm ²)	กำลังอัด (kg/cm ²)	กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm ²)
1	1	490	25.80	19.0	19.5
	2	510	26.11	19.5	
	3	520	26.16	19.9	
3	1	705	26.11	27.0	26.8
	2	690	25.60	26.9	
	3	690	26.00	26.5	
7	1	950	26.47	35.9	36.7
	2	1,000	25.70	38.9	
	3	925	26.16	35.4	
28	1	1,440	25.30	56.9	55.2
	2	1,380	25.70	53.7	
	3	1,405	25.50	55.1	

ตารางผนวกที่ ข16 ข้อมูลการทดสอบแรงกดของมอร์ตาร์ถูกบาศก์ปูนซีเมนต์ผสม PCMs ที่อัตราส่วน 50 : 50

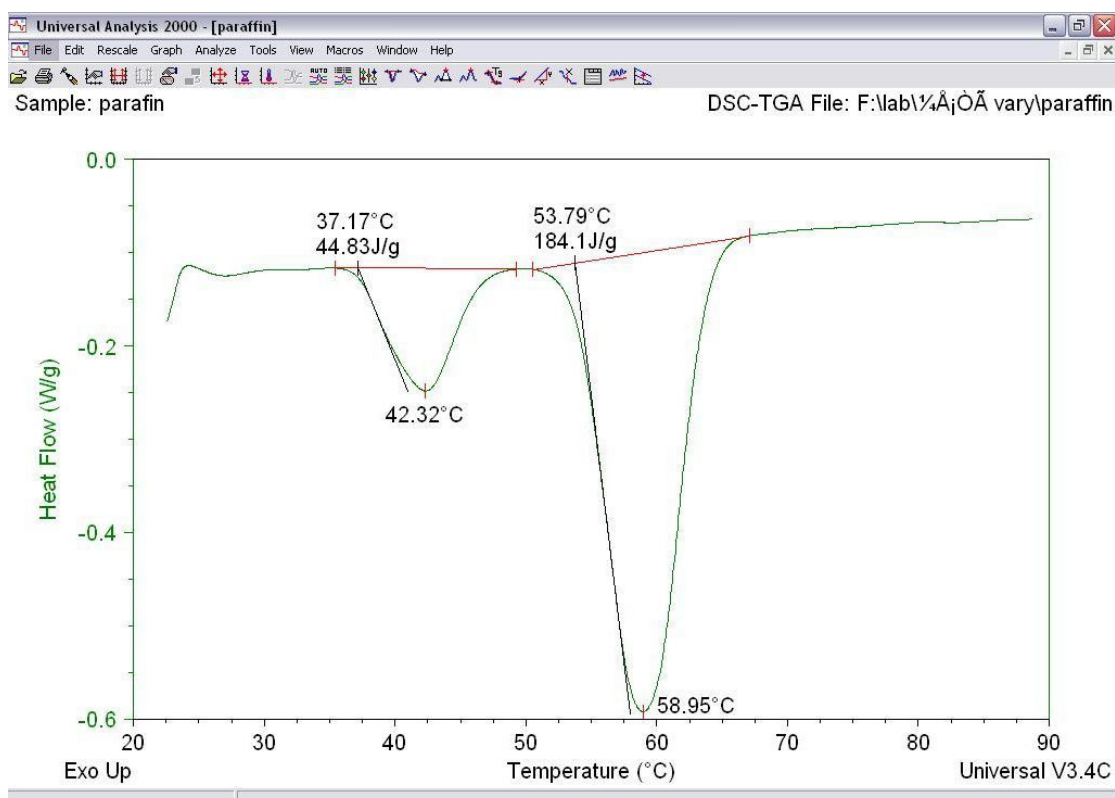
เวลาในการ ปั้มน้ำ	ก้อนที่	แรงอัด (kg)	ขนาด (cm ²)	กำลังอัด (kg/cm ²)	กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm ²)
1	1	185	26.27	7.0	6.6
	2	180	26.73	6.7	
	3	160	25.96	6.2	
3	1	345	25.95	13.3	12.9
	2	345	25.60	13.5	
	3	315	26.47	11.9	
7	1	475	26.00	18.3	18.9
	2	500	25.86	19.3	
	3	490	25.80	19.0	
28	1	795	26.06	30.5	32.3
	2	860	26.32	32.7	
	3	875	25.91	33.8	

ภาคผนวก ค

การคำนวณค่าความจุความร้อน จุดหลอมเหลวและค่าความร้อนแฝง

คุณสมบัติทางความร้อนทั้งหมดนี้เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณจากกราฟ ซึ่งได้จากเครื่อง Differential Scanning Calorimetry หรือ DSC ยี่ห้อ TA INSTRUMENT รุ่น SDT 2860 เป็นเทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน โดยใช้วิธีการพิจารณา Heat flow ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงของสารที่ทดสอบ เครื่อง DSC เป็นเครื่องมือที่ใช้ช่วยในการตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อนทั้งในเชิงฟิสิกส์และเคมีของสารที่ไม่ทราบส่วนประกอบ หรือสารที่ไม่ทราบลักษณะการเปลี่ยนสถานะ การทดสอบโดยใช้เครื่อง DSC จะสามารถให้ทั้งค่าเชิงปริมาณและคุณภาพ

โดยตัวอย่างการคำนวณค่าคุณสมบัติทางความร้อนของพาราฟินซึ่งเป็นกราฟที่มี base line อย่างค่อนข้างชัดเจน ทำให้สามารถคำนวณค่าคุณสมบัติทางความร้อนได้อย่างแม่นยำ แสดงดังนี้



ภาพผนวกที่ ค1 กราฟ DSC ของพาราฟินที่ได้จากโปรแกรม TA ANALYSIS

จากภาพผนวกที่ ค1 เห็นว่าเมื่อลากเส้น base line เชื่อมกันแล้วโปรแกรมจะให้ค่าจุดหลอมเหลวและความร้อนแฝง โดยพาราฟินมีจุดหลอมเหลวที่ 58.95 องศาเซลเซียส และมีค่าความร้อนแฝง 184.1 จูลต่อกรัม

สำหรับค่าความจุความร้อนจะแสดงการคำนวณการหาค่าความจุความร้อนของแข็ง โดยจะคำนวณจากค่าอัตราไหลความร้อน (Heat flow) ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากเครื่อง DSC และอัตราเพิ่มความร้อน (Heating rate) ซึ่งเป็นค่าที่เรากำหนดไว้ที่ 1 องศาเซลเซียสต่อนาที โดย

$$\text{ค่าความจุความร้อน (จูลต่อกรัม องศาเซลเซียส)} = \frac{\text{ค่าอัตราไหลความร้อน (วัตต์ต่อกรัม)}}{\text{อัตราเพิ่มความร้อน (องศาเซลเซียสต่อนาที)}}$$

$$\begin{aligned} \text{เช่น ค่าความจุความร้อนที่ 35 องศาเซลเซียส} &= \frac{0.1163 \text{ W} \left| \begin{array}{c|c|c|c} \text{min} & \text{J} & & 60 \text{ s} \\ \hline \text{g} & 1 \text{ }^{\circ}\text{C} & \text{s} & \text{W} & 1 \text{ min} \end{array} \right.}{1} \\ &= 6.978 \text{ J/g. }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

สำหรับค่าความจุความร้อนของแข็งของพาราฟินที่แสดงในตารางที่ 10 นั้นเป็นค่าความจุความร้อนเฉลี่ยในช่วงอุณหภูมิ 30-37 องศาเซลเซียส ซึ่งการคำนวณจะใช้โปรแกรม Excel โดยเพียงนำค่าความจุความร้อนทั้งหมดในช่วงมารวมกันแล้วหารด้วยจำนวนค่าทั้งหมดซึ่งได้เท่ากับ 7.087 จูลต่อกรัม องศาเซลเซียส

ภาคผนวก ง

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์

1. เตรียมแบบสำหรับหล่อก้อนตัวอย่าง โดยทาน้ำมัน (Mineral oil or light Cop grease) บางๆ เพื่อที่จะได้ถอดแบบง่ายๆ และป้องกันไม่ให้น้ำปูนไหลออกจากแบบ
2. เตรียมส่วนผสมสำหรับมอร์ตาร์ซีเมนต์ โดยใช้ซีเมนต์กับทรายมาตรฐานในอัตราส่วน 1:2.75 โดยน้ำหนัก ทรายมาตรฐานที่ใช้จะต้องเป็น Natural Silica Sand ที่มีขนาดส่วนกละดังตารางผนวกที่ ง1

ตารางผนวกที่ ง1 ขนาดกละของทรายมาตรฐาน

ตะแกรงเบอร์	เปอร์เซ็นต์ของมวลที่ค้างบนตะแกรง
100	98+2
50	72+2
30	2+2
16	0

3. สำหรับก้อนทดสอบ 6 ก้อน ให้ใช้ซีเมนต์ 500 กรัม ทราย 1,375 กรัมและน้ำ 242 มิลลิกรัม (น้ำ/ซีเมนต์ = 0.485) ทำการผสมซีเมนต์ ทรายและน้ำเป็นมอร์ตาร์ด้วยเครื่องผสมตามวิธีมาตรฐานสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
4. นำมอร์ตาร์มาทดสอบการไหลเพื่อให้มีการไหลแผ่ 105-115 ตามวิธีการทดสอบการไหลแผ่
5. ในการทดสอบการไหลแผ่ เช็ดแท่นให้สะอาดและแห้งแล้ววางแบบให้อยู่กึ่งกลางของแท่น จากนั้นให้ใส่มอร์ตาร์ที่ผสมแล้วลงในแบบ 1 ชั้นหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร แล้วกระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้ง (Temper) 20 ครั้ง ให้สม่ำเสมอและเพียงพอให้มอร์ตาร์เต็มแบบ จากนั้นใส่มอร์ตาร์อีกชั้นให้ล้นแบบแล้วกระทุ้งเช่นเดียวกันกับชั้นแรก ปาดมอร์ตาร์ส่วนที่เกินออกให้เรียบ ทำความสะอาดแท่นอีกครั้งหนึ่ง ยกแบบขึ้นตรงๆ จากนั้นใช้มือหมุนให้แท่นตกกระแทกในแนวตั้ง สูง ½ นิ้ว หรือ 12.7 มิลลิเมตร จำนวน 25 ครั้ง ในเวลา 15 วินาที เสร็จแล้ววัดเส้นผ่านศูนย์กลางของมอร์ตาร์ที่กระจายบนแท่น โดยหาค่าเฉลี่ยจากการวัด 4 ครั้งในช่วงห่างเท่ากัน โดยคำนวณการไหลแผ่จาก

$$\% \text{ การไหลแผ่} = ((D_1 - D_0) / D_0) \times 100$$

เมื่อ

D_0 = เส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานของแบบ

D_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของมอร์ตาร์ที่กระจายบนแท่น

หากการไหลแผ่ไม่อยู่ในช่วง 105-115 ให้ทำการทดลองใหม่โดยเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำที่ใช้จนกระทั่งได้การไหลแผ่อยู่ในช่วง 105-115 (ในการทดลองแต่ละครั้งให้ใช้มอร์ตาร์ใหม่เสมอ)



ภาพผนวกที่ ง1 แท่นทดสอบการไหลแผ่



ภาพผนวกที่ ง2 แบบและแท่งกระทุ้ง

6. การผสมมอร์ตาร์ซีเมนต์สำหรับก้อนลูกบาศก์ตัวอย่าง หลังจากเทส่วนผสมทุกอย่างลงในอ่างแล้วให้ทำการกวนผสมเป็นเวลา 90 วินาที แล้วจึงหยุดกวนผสมทิ้งส่วนผสมไว้ในอ่าง 90

วินาที ระหว่าง 15 วินาทีสุดท้าย ให้ชุดมอร์ตาร์ที่ค้างอยู่ข้างอ่างผสมลงไปรวมที่ก้นอ่าง จากนั้นจึง กวนผสมอีกครั้งด้วยความเร็วปานกลางเป็นเวลา 15 วินาที ให้รับนามอร์ตาร์ที่ผสมได้ใส่ลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้แล้วทันที

7. การหล่อแบบมอร์ตาร์ซีเมนต์จะต้องทำให้เสร็จภายในเวลา 90 วินาทีหลังจากที่ผสมมอร์ตาร์เสร็จแล้ว โดยให้ใส่มอร์ตาร์ลงในแบบหล่อเป็น 2 ชั้น ชั้นแรกหนา 25 มิลลิเมตรแล้วจึงกระทุ้ง ด้วยแท่งกระทุ้ง 32 ครั้งภายในเวลา 10 วินาที จากนั้นจึงใส่มอร์ตาร์ที่เหลือลงไปจนพูนแบบหล่อ แล้วจึงกระทุ้งเช่นเดียวกันกับครั้งแรก โดยเมื่อกระทุ้งเสร็จแล้วมอร์ตาร์จะมีระดับสูงกว่าแบบหล่อ เล็กน้อย ให้ใช้เกรียงปาดมอร์ตาร์ที่ล้นติดขอบแบบลงมาในแบบ แล้วปาดผิวให้เรียบ

8. หลังจากหล่อเสร็จเรียบร้อยแล้วให้เก็บตัวอย่างซึ่งอยู่ในแบบไว้ในห้องบ่มชื้น โดย ผิวหน้าให้สัมผัสกับความชื้นแต่ระวังไม่ให้ถูกหยดน้ำโดยตรงเป็นเวลา 20-24 ชั่วโมง จากนั้นแกะออกจากแบบแล้วจึงนำไปแช่น้ำสะอาด

9. การทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ลูกบาศก์ตามอายุที่กำหนด อนุญาตให้มีความคลาดเคลื่อนดังตารางผนวกที่ 2

ตารางผนวกที่ 2 ค่าคลาดเคลื่อนที่อนุญาตของการบ่มน้ำ

เวลาในบ่มน้ำ (วัน)	คลาดเคลื่อนได้ (ชั่วโมง)
1	0.5
3	1
7	3
28	12

การทดสอบกำลังอัด ให้เขี่ยผิวตัวอย่างให้แห้ง ปิดเม็ดทรายหรือเศษฝุ่นที่ติดที่ผิวหน้าออก ให้หมด วัดขนาดของตัวอย่างแต่ละก้อน วางก้อนทดสอบให้อยู่ศูนย์กลางของแป้นทดสอบและผิว ก้อนตัวอย่างสัมผัสกับแป้นกด รอจนก้อนตัวอย่างแตกและทำการบันทึกค่า

ภาคผนวก จ

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

ตารางผนวกที่ จ1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

เถ้าลอย	องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์)									
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
แม่เมาะ	1.11	2.21	26.43	46.25	-	1.85	3.07	7.61	-	10.71
BSCP	-	0.731	22.1	62.3	0.525	0.476	1.91	2.18	2.24	7.55

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายกำพล ล้อเลิศสกุล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	1 ตุลาคม พ.ศ.2526
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ.(วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนการศึกษาประเภท 4 จากโครงการพัฒนานักศึกษาและวิจัยด้านวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ADB)