



วิทยานิพนธ์

การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัตินวัตกรรมการผลิตวัสดุเปลี่ยนสถานะ
โดยวิธีรูปร่างคงตัวเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน

**Study and Comparison in Properties of Innovative Production of
Shape Stabilized Phase Change Materials for Energy Conservation**

นายสิริรัช อัสวโกสัย

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)
ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

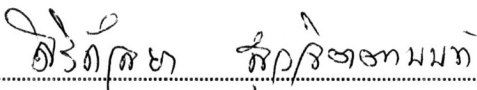
เรื่อง การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติในวัฏกรรมการผลิตวัสดุเปลี่ยนสถานะโดยวิธีรูปร่างคงตัว
เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน

Study and Comparison in Properties of Innovative Production of Shape Stabilized Phase
Change Materials for Energy Conservation

นามผู้วิจัย นายสิริรัช อัสวโกสัย

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


(รองศาสตราจารย์ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา


(รองศาสตราจารย์ไพศาล คงกาญจนาย, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์วินัย อางคงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 16 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2551

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัตินวัตกรรมการผลิตวัสดุเปลี่ยนสถานะ
โดยวิธีรูปร่างคงตัวเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน

Study and Comparison in Properties of Innovative Production of
Shape Stabilized Phase Change Materials for Energy Conservation

โดย

นายสิริรัช อัสวโกสิทธิ์

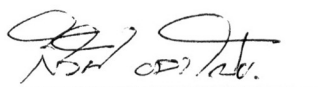
เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2551

สิริรัช อัสวโกสัย 2551: การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะโดยวิธีรูปร่างคงตัวเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน ปริญญวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์, Ph.D. 175 หน้า

ในปัจจุบันนี้สารประกอบที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์และซีฟิงพาราฟินที่เรียกว่าวัสดุเปลี่ยนสถานะแบบรูปร่างคงตัวนั้นเหมาะกับการใช้เป็นวัสดุเก็บสะสมพลังงานความร้อน โดยพลังงานความร้อนจะถูกเก็บสะสมอยู่ในรูปของความร้อนแฝงในซีฟิงพาราฟิน ในงานวิจัยนี้การทดลองแบ่งออกเป็นสองการทดลอง ในการทดลองแรกเป็นการผลิตและวิเคราะห์วัสดุเปลี่ยนสถานะแบบรูปร่างคงตัว ซึ่งส่วนประกอบแบ่งเป็นสามชุด ชุดแรกประกอบด้วยซีฟิงพาราฟินและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ชุดที่สองประกอบด้วยซีฟิงพาราฟิน พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และเอทิลีนไวโนลอะซิเตท สำหรับชุดที่สามจะมีส่วนประกอบเหมือนชุดที่สองแต่มีการเพิ่มปริมาณผงกราไฟท์เข้าไปด้วย โดยซีฟิงพาราฟินจะกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพอลิเมอร์ จากนั้นผลิตภัณฑ์ทั้งหมดจะถูกนำมาทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางความร้อน เช่น จุดหลอมเหลว ค่าความร้อนแฝง ค่าความนำความร้อนและทางด้านกลศาสตร์โดยการทดสอบแรงกด ผลจากการทดสอบความคงทนต่อรอบการใช้งานแสดงให้เห็นว่าสารประกอบที่มีซีฟิงพาราฟินและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงทั้งหมดในชุดที่หนึ่ง รวมถึงตัวอย่างที่มีปริมาณของเอทิลีนไวโนลอะซิเตทสูงในการทดลองชุดที่สองมีความคงทนต่อรอบการใช้งานมาก และผลจากการทดสอบแรงกดแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนที่มากของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในชุดที่หนึ่ง รวมถึงสัดส่วนที่มากของเอทิลีนไวโนลอะซิเตทในชุดที่สองนั้นช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกลศาสตร์ สำหรับตัวอย่างชุดที่สามแม้ว่าการเพิ่มปริมาณสัดส่วนของผงกราไฟท์จะช่วยเพิ่มค่าความนำความร้อนได้ดีขึ้นตามปริมาณของผงกราไฟท์ที่เพิ่มขึ้นก็ตาม แต่ก็ทำให้มีความคงทนต่อรอบการใช้งานและคุณสมบัติทางกลศาสตร์ลดลงตามสัดส่วนของผง กราไฟท์ที่เพิ่มเช่นเดียวกัน ในการทดลองที่สองเป็นการทดสอบระหว่างแกว่งสองชั้นที่ภายในระหว่างชั้นบรรจุซีฟิงพาราฟิน และภายในระหว่างชั้นไม่บรรจุซีฟิงพาราฟิน โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแกว่งสองชั้นที่ภายในระหว่างชั้นบรรจุซีฟิงพาราฟินมีลักษณะการลดอุณหภูมิของน้ำภายในชั้นที่ต่ำกว่า และสามารถรักษาระดับอุณหภูมิของน้ำภายในแกว่งได้นานกว่า



ลายมือชื่อนิติ



ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

18 / 3 / 51

Siritouch Asavakosri 2008: Study and Comparison in Properties of Innovative Production of Shape Stabilized Phase Change 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. 175 pages.

In recent times, composites made out of polymers and paraffin waxes called shape stabilize PCM is good for thermal energy storage materials, in which the heat is stored as latent heat of fusion in the paraffin wax. In this research, 2 kinds of experiment were studied. The first experiment has 3 sets, in set one has compounds made out of a high density polyethylene (HDPE) mixed with a commercial paraffin wax, set two has low density polyethylene (LDPE) and copolymer called ethylene vinyl acetate (EVA) mixed with paraffin wax, and set three has compounds the same with set two, but the graphite powder was added. The paraffin compound is dispersed into the network of solid polymer, and it serves as latent heat storage material while the polymer acts as a supporting material. All of these composites were produced and investigated. The most important thermal properties of these compounds, like the melting point, latent heat of fusion and thermal conductivity were studied. Additionally, a compression test was done to investigate the mechanical strength of the compounds. In a thermal cycling experiment was found, that the composites of paraffin and HDPE have long-term stability of the material and the increasing of copolymer improve this property, too. The compression test showed an improvement in the mechanical strength of the samples containing more HDPE for set one, and more copolymer in set two. But for the more of graphite powder in set three, the mechanical strength and long-term stability of the material will reduce. The thermal conductivity of the compound increase significantly by introducing graphite powder. The second experiment, the developed energy storage container is a double layer coffee cup, the gap of which can be filled with paraffin was studied. The result show that the double layer cup containing paraffin give the better thermal profile in the reducing of water temperature compared with no contain of paraffin in the gap.

Siritouch Asavakosri

Student's signature

Sirikalya Suwatjittanon 18 / 3 / 08

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือและความกรุณาจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ให้ความดูแลเอาใจใส่และให้คำปรึกษาแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์อย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณ ดร.สมเจตน์ พชรพันธ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ ที่ช่วยให้คำปรึกษา คำแนะนำ และยังแนะนำเครื่อง Hot mount ที่สามารถขึ้นรูปตัวอย่างได้ ซึ่งมีประโยชน์อย่างมาก และขอขอบคุณ รศ.ดร.ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ ประธานการสอบและ รศ.ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ อาจารย์ผู้แทนบัณฑิต ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากหน่วยงานดังต่อไปนี้ สถาบันพัฒนาและวิจัยแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และโครงการพัฒนาระบบบัณฑิตและวิจัยด้านวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ADB)

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ธุรการของภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ช่วยติดต่อประสานงานและอำนวยความสะดวกในการทำโครงการจนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณครอบครัว เพื่อนๆ พี่ๆ น้อง ๆ วิศวกรรมเคมี และบุคคลรอบข้างทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และความรู้สึที่ดีตลอดมา รวมถึงคำแนะนำและสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้

ประโยชน์อันใดอันจะเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่เมตตาอบรมสั่งสอน ให้คำแนะนำต่างๆ จนถึงปัจจุบัน

สิริรัช อัสวโกสิย์

มีนาคม 2551

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย	4
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	54
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	80
สรุปและข้อเสนอแนะ	135
สรุป	135
ข้อเสนอแนะ	137
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	139
ภาคผนวก	142
ภาคผนวก ก ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่าง	143
ภาคผนวก ข การคำนวณ	169
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	175

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1	เปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการเก็บสะสมพลังงานความร้อน
2	ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติ PCMs
3	ตัวอย่างสารอนินทรีย์ที่มีคุณสมบัติ PCMs
4	ตัวอย่างกรดไขมันที่มีคุณสมบัติ PCMs
5	ตัวอย่างสาร PCMs ที่วางขายในเชิงพาณิชย์
6	เปรียบเทียบความสามารถในการเก็บกักความร้อนของสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์
7	ปริมาณพลังงานที่ถูกปล่อยและสะสมของ PCM ด้วยวิธีการผลิตแบบ coacervated และ spray dried microencapsulated PCM
8	คุณสมบัติทางความร้อนของ shape stabilized PCM
9	ปริมาณสัดส่วนพาราฟินและ HDPE ในการทดลองชุดที่ 1
10	ปริมาณสัดส่วนพาราฟิน LDPE และ EVA ในการทดลองชุดที่ 2
11	ปริมาณสัดส่วนพาราฟิน LDPE EVA และผงกราฟไฟท์ในการทดลองชุดที่ 3
12	คุณสมบัติทางความร้อนของพาราฟินและ HDPE
13	ปริมาณสัดส่วนพาราฟินและ HDPE และคุณสมบัติทางความร้อน การทดลองชุดที่ 1
14	ปริมาณความร้อนแฝง ความร้อนแฝงตามสัดส่วน และค่าคลาดเคลื่อน ของพาราฟินในสารตัวอย่างของตัวอย่างชุดที่ 1
15	ปริมาณเปอร์เซ็นต์ความร้อนแฝงของพาราฟินในสารตัวอย่างเทียบกับพาราฟิน เปล่าของตัวอย่างชุดที่ 1
16	คุณสมบัติทางความร้อนของพาราฟิน LDPE และ EVA
17	ปริมาณสัดส่วนพาราฟิน LDPE และ EVA และคุณสมบัติทางความร้อน ของการทดลองชุดที่ 2
18	ปริมาณเปอร์เซ็นต์ความร้อนแฝงของพาราฟินในสารตัวอย่างเทียบกับพาราฟิน เปล่าของตัวอย่างชุดที่ 2
19	ปริมาณสัดส่วนพาราฟิน LDPE EVA และผงกราฟไฟท์ และคุณสมบัติ ทางความร้อนของการทดลองชุดที่ 3

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
20	ปริมาณเปอร์เซ็นต์ความร้อนแฝงของพาราฟินในสารตัวอย่างเทียบกับพาราฟิน เปล่าของตัวอย่างชุดที่ 3	100
21	คุณสมบัติทางความร้อนหลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างชุดที่ 1	106
22	คุณสมบัติทางความร้อนหลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างชุดที่ 2	110
23	คุณสมบัติทางความร้อนหลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างชุดที่ 3	114
24	ค่าความหนาแน่นของ shape stabilized PCM	117
25	ข้อมูลพื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน และปริมาตรของผงกราไฟท์	118
26	ค่าทดสอบแรงกดของตัวอย่างชุดที่ 1 (ตัวอย่างที่ 1 ถึง 4)	120
27	ค่าทดสอบแรงกดของตัวอย่างชุดที่ 2 (ตัวอย่างที่ 5 ถึง 9)	122
28	ค่าทดสอบแรงกดของตัวอย่างชุดที่ 3 (ตัวอย่างที่ 10 ถึง 13)	125
29	ค่าความนำความร้อนของตัวอย่างชุดที่ 3 และตัวอย่างที่ 6	129
30	ค่า Heating และ Cooling curve ของชุดการทดลองที่ 3 และตัวอย่างที่ 6	131

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก1 คุณสมบัติทางความร้อนของพาราฟินและ HDPE	143
ก2 ปริมาณสัดส่วนพาราฟินและ HDPE และคุณสมบัติทางความร้อนการทดลองชุดที่ 1	144
ก3 คุณสมบัติทางความร้อนของพาราฟิน LDPE และ EVA	144
ก4 ปริมาณสัดส่วนพาราฟิน LDPE และ EVA และคุณสมบัติทางความร้อนของการทดลองชุดที่ 2	145
ก5 ปริมาณสัดส่วนพาราฟิน LDPE EVA และผงกราไฟท์ และคุณสมบัติทางความร้อนของการทดลองชุดที่ 3	146
ก6 ค่าความหนาแน่นของ shape stabilized PCM	161
ก7 ค่าทดสอบแรงกดของตัวอย่างชุดที่ 1 (ตัวอย่างที่ 1 ถึง 4)	162
ก8 ค่าทดสอบแรงกดของตัวอย่างชุดที่ 2 (ตัวอย่างที่ 5 ถึง 9)	162
ก9 ค่าทดสอบแรงกดของตัวอย่างชุดที่ 3 (ตัวอย่างที่ 10 ถึง 13)	163
ก10 ค่าความนำความร้อนของตัวอย่างชุดที่ 3 และตัวอย่างที่ 6	165
ก11 ค่า Heating และ Cooling curve ของชุดการทดลองที่ 3 และตัวอย่างที่ 6	166
ข1 การคำนวณค่าคลาดเคลื่อนของความร้อนแฝงของพาราฟินในสารตัวอย่างที่ผลิตได้เทียบกับความร้อนแฝงของพาราฟินในสารตัวอย่างตามทฤษฎีกรณีตัวอย่างที่ 1	171
ข2 การคำนวณค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์	171
ข3 ค่าที่ใช้ในการคำนวณหาค่า VR large	172
ข4 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบแรงกด	174

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างของพอลิเมอร์สายโซ่ตรง สายโซ่กิ่งและโครงร่างแห	7
2	การแบ่งประเภทของพอลิเมอร์	9
3	แผนภาพแสดงขั้นตอนการขึ้นรูปพอลิเมอร์	12
4	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีน	13
5	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท	14
6	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับพลังงานของสารในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว	18
7	แผ่นผนังเก็บกักความร้อนที่ใช้สาร PCM ผสมกับ vinyl sheets	22
8	บ้านของ David Allan ที่ใช้ PCM มาเป็นสารที่ให้ความอบอุ่นภายในบ้านในเวลา กลางคืน	23
9	บรรจุกัมมันต์ TCP (Thermal Control Panel)	24
10	เสื้อให้ความเย็น (cooling vest) ของบริษัท ClimaTech	25
11	แผนผังแสดงการติดตั้ง PCM gypsum board ของห้องทดสอบ	29
12	ผลการทดลองวันที่ท้องฟ้าโปร่งในช่วงฤดูหนาว (O. board denote ordinary board)	30
13	การเปรียบเทียบสมรรถภาพของระบบให้ความร้อนใต้พื้นห้องโดยใช้และไม่ใช้ PCM	34
14	ลักษณะของ microencapsulation ของพาราฟิน ที่พัฒนาโดย SEM ในรอบของการ ให้ความร้อนต่างๆกัน	35
15	เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการผลิต paraffin/graphite expanded PCM	38
16	(a) shape-stabilized PCM ในลักษณะ plate (b) ภาพถ่าย SEM ของ shape stabilized PCM โดยเครื่อง HITACHI S-450	43
17	โครงสร้างโมเลกุลของ paraffin wax, polyethylene และ ethylene-vinyl acetate	45
18	ชุดเครื่องมือ DSC	47
19	ชุดอุปกรณ์สำคัญของเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	ตำแหน่งการจัดวางอุปกรณ์ของ DSC Apparatus	49
21	คุณสมบัติต่างๆที่ทดสอบได้จากเครื่อง DSC	50
22	ตัวอย่างกราฟในช่วงเริ่มแรกของการทดสอบสารตัวอย่างด้วยเครื่อง DSC	51
23	กราฟที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC สำหรับกระบวนการดูดความร้อน	52
24	กราฟที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC สำหรับกระบวนการคายความร้อน	52
25	ชุดอุปกรณ์ประกอบด้วย ถ้วยสแตนเลส เครื่องปั่นไฟฟ้าและอุปกรณ์ให้ความร้อน	56
26	เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 3 ตำแหน่ง	56
27	โมลด์ซิลิโคน	56
28	เครื่องปั่นไฟฟ้าขนาดเล็ก	57
29	เครื่อง Hot mount	57
30	ขั้นตอนการเทเจลใส่โมลด์และหลังจากเอาออกจากโมลด์	59
31	ผงชิ้นงานหลังจากผ่านเครื่องปั่นไฟฟ้าละเอียด	60
32	Shape stabilized PCM	60
33	เครื่อง water bath	63
34	1 รอบการใช้งาน (1 cycle) ใช้เวลา 300 นาที	64
35	ตำแหน่งที่จะนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	65
36	เครื่อง Multipycnometer	66
37	เครื่องทดสอบแรงกด	69
38	ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกด	69
39	เครื่อง SEM ยี่ห้อ PHILIBS รุ่น XL30	70
40	ชุดเครื่องมือหาค่าความนำความร้อน	72
41	เทอร์โมมิเตอร์	73
42	ลักษณะอุปกรณ์และชิ้นงานทดสอบ heating & cooling curve	74
43	การทดลอง heating & cooling curve	75
44	(a) การทดลองแก้วสองชั้นที่มีพาราฟินภายในระหว่างชั้น	
	(b) การทดลองแก้วสองชั้นที่มีอากาศภายในระหว่างชั้น	76
45	ลักษณะและขนาดแก้วทดลอง 2 ชั้นขนาดใหญ่ที่ใช้ทดสอบ	77

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
46	ลักษณะและขนาดแก้วทดลองชั้นนอกที่ใช้ทดสอบ
47	ลักษณะและขนาดแก้วทดลองขนาดใหญ่ชั้นในที่ใช้ทดสอบ
48	ผลิตภัณฑ์ shape stabilized PCM
49	กราฟ DSC ของพาราฟินและ HDPE
50	กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 1
51	กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 2
52	กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 3
53	กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 4
54	กราฟ DSC ของตัวอย่างชุดที่ 1
55	กราฟ DSC ของพาราฟิน LDPE และ EVA
56	กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 5
57	กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 6
58	กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 7
59	กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 8
60	กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 9
61	กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 10
62	กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 11
63	กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 12
64	กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 13
65	ผลิตภัณฑ์ shape stabilized PCM ตัวอย่างชุดที่ 1 ก่อนและหลังการใช้งาน 20 รอบ
66	ผลิตภัณฑ์ shape stabilized PCM ตัวอย่างชุดที่ 2 ก่อนและหลังการใช้งาน 20 รอบ
67	ผลิตภัณฑ์ shape stabilized PCM ตัวอย่างชุดที่ 3 ก่อนและหลังการใช้งาน 20 รอบ
68	กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 1

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
69 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 2	108
70 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 3	108
71 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 4	109
72 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 5	111
73 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 6	111
74 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 7	112
75 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 8	112
76 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 9	113
77 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 10	115
78 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 11	115
79 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 12	116
80 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 13	116
81 การกระจายขนาดของรูพรุนของผงกราฟไฟท์	118
82 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะการหดตัวของตัวอย่างชุดที่ 1	120
83 ลักษณะตัวอย่างชุดที่ 1 ก่อนและหลังทดสอบแรงกด	121
84 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะการหดตัวของตัวอย่างชุดที่ 2	122
85 ลักษณะตัวอย่างชุดที่ 2 ก่อนและหลังทดสอบแรงกด	123
86 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะการหดตัวของตัวอย่างชุดที่ 3	125
87 แสดงลักษณะตัวอย่างชุดที่ 3 ก่อนและหลังทดสอบแรงกด	126
88 ภาพถ่าย SEM ชุดการทดลองที่ 1 ตัวอย่างที่ 2 (พาราฟิน/HDPE)	127
89 ภาพถ่าย SEM ชุดการทดลองที่ 2 ตัวอย่างที่ 6 (พาราฟิน/LDPE/EVA)	128
90 ภาพถ่าย SEM ชุดการทดลองที่ 3 ตัวอย่างที่ 12 (พาราฟิน/LDPE/EVA/ผงกราฟไฟท์)	128
91 Heating curve ของชุดการทดลองที่ 3 และตัวอย่างที่ 6	130
92 Cooling curve ของชุดการทดลองที่ 3 และตัวอย่างที่ 6	130
93 กราฟการลดอุณหภูมิของแก้วสองชั้นสองแบบ	133

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 กราฟ DSC ของพาราฟินและ HDPE	146
ก2 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 1	147
ก3 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 2	147
ก4 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 3	148
ก5 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 4	148
ก6 กราฟ DSC ของตัวอย่างชุดที่ 1	149
ก7 กราฟ DSC ของพาราฟิน LDPE และ EVA	149
ก8 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 5	150
ก9 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 6	150
ก10 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 7	151
ก11 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 8	151
ก12 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 9	152
ก13 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 10	152
ก14 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 11	153
ก15 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 12	153
ก16 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 13	154
ก17 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 1	154
ก18 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 2	155
ก19 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 3	155
ก20 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 4	156
ก21 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 5	156
ก22 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 6	157
ก23 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 7	157
ก24 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 8	158
ก25 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 9	158
ก26 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 10	159
ก27 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 11	159

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก28 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 12	160
ก29 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 13	160
ก30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะการหดตัวของตัวอย่างชุดที่ 1	164
ก31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะการหดตัวของตัวอย่างชุดที่ 2	164
ก32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะการหดตัวของตัวอย่างชุดที่ 3	165
ก33 Heating curve ของชุดการทดลองที่ 3 และตัวอย่างที่ 6	167
ก34 Cooling curve ของชุดการทดลองที่ 3 และตัวอย่างที่ 6	167
ก35 กราฟการลดอุณหภูมิของแก้วสองชั้นสองแบบ	168
ข1 กราฟ DSC ของ HDPE ที่ได้จากโปรแกรม TA ANALYSIS	169
ข2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะการหดตัวของตัวอย่างที่ 1	174

การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติในวัฏกรรมการผลิตวัสดุเปลี่ยนสถานะ โดยวิธีรูปร่างคงตัวเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน

Study and Comparison in Properties of Innovative Production of Shape Stabilized Phase Change Materials for Energy Conservation

คำนำ

การใช้พลังงานไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงในช่วงระหว่างเวลากลางวันและกลางคืนตามความต้องการของโรงงานอุตสาหกรรม อาคารพาณิชย์และบ้านพักอาศัย โดยเฉพาะในประเทศที่มีสภาพอากาศที่ร้อนหรือหนาวจัดแตกต่างกันมากในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน การเปลี่ยนแปลงส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเนื่องจากเครื่องทำความร้อนและเครื่องปรับอากาศ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดระบบของราคาที่แตกต่างกันสำหรับช่วงการใช้พลังงานสูงสุดและช่วงการใช้พลังงานต่ำสุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าการจัดการพลังงานและการวิเคราะห์ทางเศรษฐกิจสามารถประสบความสำเร็จได้ โดยถ้าในบางช่วงของการใช้พลังงานสูงสุดสามารถถูกเลื่อนไปใช้ช่วงที่มีความต้องการใช้พลังงานต่ำ ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการเก็บสะสมพลังงานความร้อน การสะสมพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์จึงถูกนำมาใช้ เพื่อเพิ่มความสามารถของระบบสะสมพลังงานความร้อนโดยประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์นั้นขึ้นอยู่กับพื้นที่และวิธีที่ใช้ในการเก็บสะสมพลังงานความร้อน

ประเทศส่วนใหญ่ในทวีปยุโรป พลังงานความร้อนจะถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสมด้วยการใช้ความร้อนจำเพาะของน้ำ (sensible heat) จากถังเก็บน้ำขนาดใหญ่ หรือในชั้นหิน น้ำจะทำหน้าที่เป็นวัสดุสะสมพลังงานความร้อน (energy storage material) ซึ่งมีข้อได้เปรียบหลายประการ เช่น ราคาถูก หาได้ง่าย ไม่มีสารพิษและยังมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี เช่น มีค่าความร้อนจำเพาะและค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ที่สูง ดังนั้นน้ำจึงนิยมนำมาใช้เป็นตัวกลางในระบบทางความร้อนอยู่เสมอ หรือในระบบสะสมพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ (solar energy system) โดยจะทำหน้าที่เป็นสื่อถ่ายเทความร้อน (heat transfer fluid) และเป็นวัสดุสะสมพลังงานความร้อน แต่การสะสมของพลังงานความร้อนด้วยการใช้ความร้อนจำเพาะจากน้ำนั้นก็ยังมีข้อเสียบางประการ คือ อุณหภูมิของน้ำจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของพลังงานความร้อนที่สะสม ดังนั้นการสูญเสียพลังงานความร้อนก็จะเพิ่มสูงขึ้นด้วย ดังสมการ

$$Q = C_p \cdot (v - v_{amb}) \Leftrightarrow \frac{dQ}{dt} = k \cdot A \cdot (v - v_{amb}) \quad (1)$$

โดย

- Q คือ ปริมาณความร้อนสะสม
- v คือ อุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อน (temperature of storage medium)
- C_p คือ ค่าความจุความร้อน
- $\frac{dQ}{dt}$ คือ พลังงานความร้อนสูญเสีย
- k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทพลังงานความร้อนระหว่างวัสดุสะสมพลังงานความร้อนกับบรรยากาศ
- A คือ พื้นที่ผิวส่งผ่านความร้อน
- $v - v_{amb}$ คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวัสดุสะสมพลังงานความร้อนกับบรรยากาศ

ดังนั้นในการที่จะป้องกันการเกิดการสูญเสียพลังงานความร้อน จึงต้องมีการหุ้มฉนวนอย่างระมัดระวังเพื่อที่จะลดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทพลังงานความร้อนระหว่างวัสดุสะสมพลังงานความร้อนกับบรรยากาศ (k) ซึ่งผลที่ตามมาคือราคาของระบบการสะสมพลังงานความร้อนสูงขึ้น ความเป็นไปได้ของอื่นสำหรับการสะสมพลังงานความร้อนคือ การสะสมความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะ (latent heat storage) ซึ่งเป็นปริมาณความร้อนที่สะสมอยู่ในวัสดุเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุล โดยการเปลี่ยนสถานะจะเป็นการเปลี่ยนสถานะระหว่างของแข็งกับของเหลวและระหว่างของเหลวกับก๊าซแต่ควรจะเป็นการเปลี่ยนสถานะระหว่างของแข็งกับของเหลวมากกว่าหรือการเปลี่ยนระหว่างโครงสร้างผลึกและโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ (crystalline and amorphous structure) เนื่องจากจะมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรสูงสำหรับการเปลี่ยนสถานะระหว่างของเหลวกับก๊าซจึงไม่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในกรณีสะสมความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะ โดยปกติวัสดุเปลี่ยนสถานะระหว่างของเหลวกับของแข็ง (liquid-solid phase change materials) ที่มีการเปลี่ยนสถานะในอุณหภูมิระหว่าง 20 องศาเซลเซียส ถึง 80 องศาเซลเซียส ได้แก่ ขี้ผึ้งพาราฟิน (paraffin wax) เกลือไฮเดรต (hydrated salts) และกรดไขมัน (fatty acids) ขี้ผึ้งพาราฟินนั้นหาได้ง่าย และมีค่าความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะประมาณ 200 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ในขณะที่เกลือไฮเดรตมีค่าความร้อนแฝงมากกว่าขี้ผึ้งพาราฟินสองเท่า รวมถึงราคาถูกและหาได้ง่ายกว่า แต่ก็มีข้อเสียบางประการคือ มีการเปลี่ยนสถานะกลับเป็นของแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว (supercooling of the melt) และมีการกัดกร่อนกับโลหะ กรดไขมันมีลักษณะ

คล้ายขี้ผึ้งพาราฟิน มีค่าความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะประมาณ 200 กิโลจูลต่อกิโลกรัม แต่มีราคาสูงกว่าขี้ผึ้งพาราฟิน

การสะสมพลังงานความร้อนด้วยวิธีความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะมีประสิทธิภาพมากกว่าการสะสมพลังงานความร้อนด้วยความร้อนจำเพาะในหลายๆด้าน เช่น เมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลวในช่วงอุณหภูมิแคบ จะมีการเก็บสะสมพลังงานความร้อนในรูปความร้อนแฝงแต่ไม่มีการเพิ่มของอุณหภูมิ เนื่องจากพลังงานทั้งหมดจะถูกนำไปใช้ในการเปลี่ยนสถานะ และในทางกลับกันเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลับมาเป็นของแข็ง พลังงานดังกล่าวจะถูกปล่อยออกมาโดยที่อุณหภูมิคงที่ ในขณะที่พลังงานดังกล่าวต่อน้ำหนักนั้นมีค่าสูง จึงสามารถสะสมพลังงานความร้อนได้ในปริมาณมากโดยที่ไม่มีการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุ ซึ่งทำให้ไม่มีการสูญเสียพลังงาน ประโยชน์อีกอย่างคือพลังงานในปริมาณมากสามารถสะสมได้โดยน้ำหนักของวัสดุเปลี่ยนสถานะ (phase change materials, PCMs) อย่างไรก็ตามการสะสมพลังงานความร้อนในรูปความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะก็มีข้อเสียบางประการ นั่นคือวัสดุสะสมพลังงานความร้อนจะมีการเปลี่ยนสถานะขณะใช้งาน ซึ่งต้องใช้ความพยายามอย่างสูงในการควบคุมการใช้งาน ดังนั้น PCM ส่วนมากจึงมีการห่อหุ้ม (encapsulated) ด้วยวัสดุชนิดอื่น อีกทั้งวัสดุเปลี่ยนสถานะโดยส่วนใหญ่มีค่าความนำความร้อนที่ต่ำ โดยในการเพิ่มค่าอัตราการส่งผ่านความร้อน (heat transfer rate) นั้น พื้นที่ในการส่งผ่านความร้อนของวัสดุที่บรรจุ PCM จึงจำเป็นต้องมีพื้นที่มาก ซึ่งทำได้โดย การเพิ่มครีป (fins) และการห่อหุ้ม PCM (encapsulation PCM) เนื่องจากขั้นตอนการผลิตที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ราคาของ PCM แพงขึ้น ดังนั้น encapsulation PCM จึงถูกประยุกต์ใช้งานเฉพาะในกรณีพิเศษ อย่างไรก็ตามหากราคาของ encapsulation PCM ลดลงและข้อเสียในการใช้งานสามารถกำจัดได้ การสะสมพลังงานความร้อนในรูปความร้อนแฝงของการหลอมเหลวจะเป็นที่นิยมมากกว่าวิธีสะสมพลังงานด้วยวิธีความร้อนจำเพาะ ดังข้อดีที่ได้กล่าวมา

โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมีความสนใจในการห่อหุ้มขี้ผึ้งพาราฟิน โดยใช้โครงสร้างพอลิเมอร์เป็นวัสดุห่อหุ้มเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการใช้งานวัสดุเปลี่ยนสถานะในรูปแบบของแข็งหรือวัสดุเปลี่ยนสถานะแบบรูปร่างคงตัว (shape stabilized PCM) โดยหลักการและขั้นตอนจะกล่าวในส่วนต่อไป

วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย

วัตถุประสงค์

ศึกษาขั้นตอนการผลิตและเปรียบเทียบคุณสมบัติในด้านต่างๆของ encapsulation PCM โดยใช้โครงสร้าง (matrix) พอลิเมอร์เป็นวัสดุรองรับการกระจายตัวของขี้ผึ้งพาราฟิน เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการใช้งานวัสดุเปลี่ยนสถานะในรูปแบบของ แข็งหรือวัสดุเปลี่ยนสถานะแบบรูปร่างคงตัว (shape stabilized PCM) ในรูปสัดส่วนของขี้ผึ้งพาราฟินต่อพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน ขี้ผึ้งพาราฟินจะถูกใช้เป็น PCM ซึ่งจะห่อหุ้มด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์ของ Low Density Polyethylene (LDPE) High Density Polyethylene (HDPE) และ Ethylene-Vinyl-Acetate (EVA) ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน โดยในบางตัวอย่างจะมีการเพิ่มผงกราไฟท์เพื่อเพิ่มค่าความนำความร้อนด้วย

ขอบเขตงานวิจัย

1. วัสดุ PCM ที่ใช้ในการศึกษา คือ ขี้ผึ้งพาราฟิน (paraffin wax)
2. สัดส่วนขี้ผึ้งพาราฟินต่อพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง คือ
 - 2.1 ขี้ผึ้งพาราฟิน: HDPE
 - i. 50 : 50
 - ii. 60 : 40
 - iii. 70 : 30
 - iv. 75 : 25
 - 2.2 ขี้ผึ้งพาราฟิน: LDPE: EVA
 - i. 55 : 45 : 0
 - ii. 55 : 30 : 15
 - iii. 55 : 22.5 : 22.5
 - iv. 55 : 15 : 30
 - v. 55 : 0 : 45
 - 2.3 ขี้ผึ้งพาราฟิน: LDPE: EVA: ผงกราไฟท์
 - i. 55 : 27 : 13 : 5
 - ii. 55 : 25 : 10 : 10

iii. 55 : 20 : 10 : 15

iv. 55 : 15 : 10 : 20

3. ตัวแปรที่สนใจศึกษา

3.1 ความเป็นไปได้ของสารประกอบผลิตภัณฑ์

3.2 ความคงทนต่อการใช้งานในระยะยาว

3.3 ความคงทนต่อการใช้งานด้านคุณสมบัติทางกล

3.4 คุณสมบัติทางความร้อน เช่น จุดหลอมเหลว ช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว ความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะ ค่าความนำความร้อนและค่าความจุความร้อน

4. ช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา คือ 25-150 องศาเซลเซียส

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

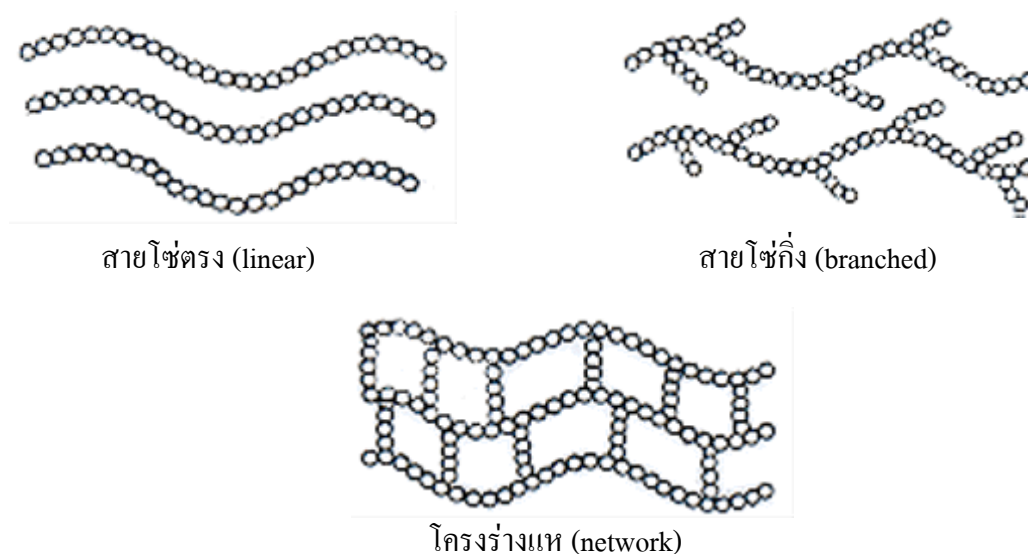
สามารถพัฒนาวัสดุเปลี่ยนสถานะในรูปแบบของแข็งหรือวัสดุเปลี่ยนสถานะแบบรูปร่างคงตัว (shape stabilized PCM) โดยใช้คุณสมบัติของ PCM ที่สามารถเก็บสะสมพลังงานในรูปความร้อนแฝงมาใช้ประโยชน์ รวมถึงคุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนสถานะแบบรูปร่างคงตัวที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับผลิตภัณฑ์จนเกินจุดหลอมเหลวของจีฟีนพาราฟินแล้ว ก็จะไม่มีการรั่วไหลออกของจีฟีนพาราฟินออกมาจากผลิตภัณฑ์ โดยผลิตภัณฑ์จะยังคงรูปเดิม ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการนำไปใช้งานประเภทที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เราต้องการได้นานขึ้น เช่น บรรจุภัณฑ์เก็บรักษาอาหาร เสื่อให้ความเย็น เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร อาหาร ไวน์ ผลิตภัณฑ์จากนม รวมถึงใช้ในเรือนกระจกสำหรับเพาะปลูกพืช รักษาอุณหภูมิในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ให้ความเย็นแก่รถยนต์ (ทั้งความร้อนจากไฟฟ้าและการเผาไหม้) ลดอุณหภูมิเนื่องจากการคายพลังงานจากปฏิกิริยาเคมี ระบบความร้อนในยานอวกาศ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน และด้านการแพทย์ เช่น การขนส่งเลือด ใต้ปฏิบัติการทางการแพทย์

การตรวจเอกสาร

1. พอลิเมอร์ (Polymer)

นิยามของคำว่าพอลิเมอร์หมายถึงสสารที่ประกอบด้วยโมเลกุลขนาดใหญ่และยาว มีน้ำหนักโมเลกุลมาก (อาจมีน้ำหนักโมเลกุลเป็นหมื่น หรืออาจสูงถึงหลายล้าน) ซึ่งประกอบย่อยจากกลุ่มของอะตอมหรือโมเลกุลขนาดเล็กที่ซ้ำๆกัน โดยเรียกหน่วยซ้ำๆกันว่า repeating unit หน่วยซ้ำๆกันนี้เชื่อมต่อกันด้วยพันธะปฐมภูมิ (primary bonds) ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ คำว่าแมโครโมเลกุล (macromolecules) หมายถึงโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักโมเลกุลมาก ที่อาจมีได้เกิดจากหน่วยซ้ำๆเป็นองค์ประกอบ ในอดีตหมายถึงพอลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymers) เช่น โปรตีน อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีการใช้คำแมโครโมเลกุล และพอลิเมอร์ทดแทนกันได้ทุกกรณี พอลิเมอร์เกิดจากการเชื่อมต่อกันของโมเลกุลมอนอเมอร์ (monomers) ซึ่งเป็นสารโมเลกุลเล็ก ที่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับโมเลกุลมอนอเมอร์ชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน แล้วเกิดเป็นสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ขนาดยาวและใหญ่ โดยโครงสร้างโมเลกุลของมอนอเมอร์อาจมีหมู่ฟังก์ชันที่ปลายทั้งสองข้างของโมเลกุลหรืออาจมีพันธะที่ไม่อิ่มตัว เช่น พันธะคู่ หรือพันธะสาม ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization reaction) ซึ่งสามารถเกิดผ่านกลไกปฏิกิริยาหลายแบบ เช่น พอลิเมอไรเซชันแบบรวมตัว (addition polymerization) หรือแบบควบแน่น (condensation polymerization) เกิดเป็นพอลิเมอร์ขึ้น เมื่อมอนอเมอร์เกิดปฏิกิริยาเคมีรวมตัวกันสองโมเลกุล สามโมเลกุล หรือหลายๆโมเลกุล ก็จะเรียกสารที่เกิดขึ้นว่าไดเมอร์ (dimer) ไตรเมอร์ (trimer) และโอลิโกเมอร์ (oligomer) ตามลำดับ

นิยามโครงสร้างโมเลกุลพอลิเมอร์ สามารถแบ่งได้เป็นพอลิเมอร์สายตรง (linear polymer) ซึ่งเป็นสายเดี่ยวที่มีสองปลายสายโซ่ อีกชนิดหนึ่ง ได้แก่ พอลิเมอร์สายโซ่ไม่ตรง (non-linear polymers) ดังแสดงดังภาพที่ 1



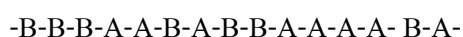
ภาพที่ 1 โครงสร้างของพอลิเมอร์สายโซ่ตรง สายโซ่กิ่งและโครงร่างแห

พอลิเมอร์สายโซ่กิ่ง (branched polymers) มีสายโซ่ด้านข้างหรือกิ่ง (branched) เชื่อมติดสายโซ่หลัก (main chains) ที่จุดเชื่อมกิ่ง (branch points หรือ junction points) สำหรับพอลิเมอร์โครงร่างแห (network polymers) มีโครงสร้างโยงเป็นตาข่ายร่างแหสามมิติ ที่มีการเชื่อมโยง (crosslink density) ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับจำนวนจุดที่เชื่อมโยงต่อปริมาตร

พอลิเมอร์เดี่ยว (homopolymers) คือพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์เพียงหนึ่งชนิด หรือสามารถเขียนเป็นหน่วยซ้ำๆกัน (repeating unit) ได้จากมอนอเมอร์เพียงชนิดเดียว อาจเขียนโครงสร้างได้ดังนี้



พอลิเมอร์ร่วม หรือโคพอลิเมอร์ (copolymers) คือพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์มากกว่าหนึ่งชนิด พอลิเมอร์ร่วมสามารถแบ่งชนิดได้ตามลำดับการเรียงตัวของมอนอเมอร์ ได้แก่ พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม (random copolymers หรือ statistical copolymers) มีการจัดเรียงของมอนอเมอร์แต่ละชนิดอย่างไม่เป็นระเบียบ สามารถเขียนโครงสร้างได้เป็นดังนี้



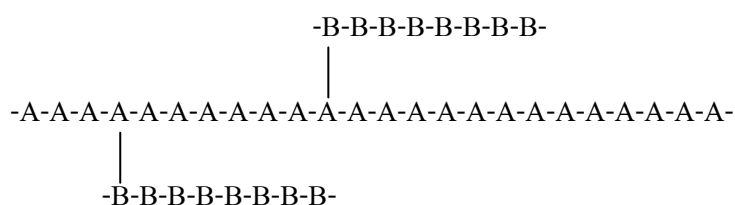
พอลิเมอร์ร่วมแบบสลับ (alternating copolymers) เป็นพอลิเมอร์ร่วมที่มีการสลับของมอนอเมอร์อย่างเป็นระเบียบ ดังนี้



พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม หรือแบบบล็อก (block copolymers) เป็นพอลิเมอร์ร่วมสายโซ่ตรงที่มีหน่วยซ้ำกันเป็นมอนอเมอร์ชนิดเดียวกันเป็นกลุ่ม ชนิดที่สำคัญได้แก่ ชนิดสองกลุ่ม (AB di-block) และชนิดสามกลุ่ม (ABA tri-block copolymers)

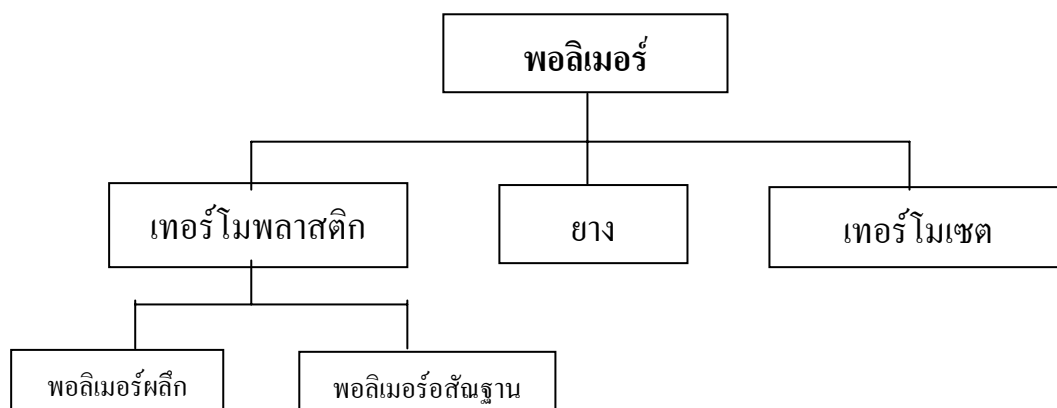


พอลิเมอร์ร่วมแบบกิ่ง หรือแบบกราฟท์ (graft copolymers) เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบกิ่งที่มีโมเลกุลของโครงสร้างหลัก และสายโซ่กิ่งเป็นโมเลกุลต่างชนิดกัน



1.1 การแบ่งประเภทของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์สามารถถูกจัดแบ่งประเภทอย่างกว้างๆ ได้ดังแสดงในภาพ 2 กล่าวคือสามารถแบ่งได้เป็นสามประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ เทอร์โมพลาสติก (thermoplastics) ยาง (elastomers หรือ rubbers) และเทอร์โมเซต (thermoset) และเทอร์โมพลาสติกสามารถแบ่งย่อยได้เป็นพอลิเมอร์ผลึก (crystalline polymers) และพอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous polymers) หรือพอลิเมอร์ที่ไม่เป็นผลึก (non-crystalline polymers) นั่นเอง



ภาพที่ 2 การแบ่งประเภทของพอลิเมอร์

เทอร์โมพลาสติก (thermoplastics) บางครั้งอาจเรียกสั้นๆ ว่าพลาสติก เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรงหรือกิ่งที่สามารถเกิดการหลอมเหลวเมื่อให้ความร้อน สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้มากกว่าหนึ่งครั้ง โดยกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ เช่น การฉีดขึ้นรูป (injection molding) การอัดรีด (extrusion) ฯลฯ เทอร์โมพลาสติกบางชนิดสามารถตกผลึกได้เมื่อทำให้เย็น เมื่อโครงสร้างโมเลกุลเปลี่ยนสภาพจากที่พันกันยุ่งเหยิง (random coils) เมื่ออยู่ในสถานะของเหลวเมื่อร้อน กลายเป็นผลึกพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่อย่างเป็นระเบียบเมื่อถูกทำให้เย็นเป็นสถานะของแข็ง อุณหภูมิที่ทำให้พอลิเมอร์ผลึกเกิดการเปลี่ยนสถานะจากหลอมเหลวได้ เปลี่ยนผลึกของแข็งเรียกว่า อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (melting temperature, T_m) อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ในธรรมชาติไม่สามารถเกิดเป็นผลึกพอลิเมอร์ได้ 100% เนื่องจากข้อจำกัดของโครงสร้างพอลิเมอร์เกิดการพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้โมเลกุลสายโซ่พอลิเมอร์ไม่สามารถจัดเรียงตัวเกิดเป็นผลึกได้อย่างสมบูรณ์ทั้งหมด จึงเกิดบางส่วนที่เป็นอสัณฐาน หรือไม่เป็นผลึก (amorphous regions) ดังนั้น จึงอาจเรียกพอลิเมอร์ผลึกว่าเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semi-crystalline polymers) ในเทอร์โมพลาสติกบางชนิดไม่สามารถเกิดเป็นผลึกได้เลยเนื่องจากข้อจำกัดของโครงสร้างโมเลกุล จึงเกิดเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous polymers) ทั้งพอลิเมอร์อสัณฐานและส่วนที่เป็นอสัณฐานในพอลิเมอร์กึ่งผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่พอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) พอลิเมอร์มีความแข็งแรงแต่เปราะคล้ายแก้ว เปลี่ยนสถานะคล้ายยาง (rubbery state) พอลิเมอร์มีความอ่อน ยืดหยุ่นคล้ายยาง ที่อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วนี้ จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิเริ่มต้นของการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g สายโซ่พอลิเมอร์ไม่สามารถจะเคลื่อนไหวได้เหมือนกับถูกแช่แข็ง (frozen) ในลักษณะนั้น ทั้งอุณหภูมิ T_m และ T_g จะสัมพันธ์โดยตรงกับ

โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ กล่าวคือ T_m และ T_g จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความแข็งของสายโซ่ (chain stiffness) รวมทั้งเพิ่มแรงกระทำระหว่างสายโซ่ (intermolecular attraction)

ยางหรืออีลาสโตเมอร์ (elastomers) คือพอลิเมอร์ประเภทที่ถูกเชื่อมโยง (crosslinked) เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ สามารถถูกดึงยืดได้หลายเท่าของความยาวเดิม โดยอาจได้ถึงสิบเท่า และสามารถหดกลับสู่รูปร่างและขนาดเดิมอย่างรวดเร็วเมื่อทำการปล่อยแรง ซึ่งสมบัติของยางอาจขึ้นกับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง เมื่อทำการเชื่อมโยงหรือวัลคาไนเซชันยางแล้ว จะไม่สามารถขึ้นรูปยางใหม่ได้ แต่จะสลายตัว (degrade) เนื่องจากความร้อนเมื่อให้อุณหภูมิสูงเกินไป

เทอร์โมเซต (thermosets) เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดการเชื่อมโยงมีโครงสร้างเป็นร่างแหสามมิติ การเคลื่อนไหวของสายโซ่ถูกจำกัดเนื่องจากมีองศาการเชื่อมโยงที่สูง เมื่อทำการขึ้นรูปและเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่แล้วและไม่สามารถให้ความร้อนขึ้นรูปใหม่ได้ แต่จะสลายตัวเนื่องจากความร้อนแทน เช่นเดียวกับยาง

1.2 ประโยชน์และข้อจำกัดของพอลิเมอร์

ปัจจุบันพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย มีประโยชน์และการใช้งานมากมาย โดยมีแนวโน้มของปริมาณการผลิตและการใช้งานของพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว มีส่วนเกี่ยวข้องในชีวิตประจำวันของเราอย่างมาก การที่พอลิเมอร์เป็นที่นิยมใช้สามารถใช้แทนวัสดุต่างๆ มากมาย ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์มีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น

1. ง่ายต่อการขึ้นรูป (moldable) ทำให้สะดวกต่อการผลิตชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อน โดยใช้ขั้นตอนการผลิตไม่ก้ำกั้น ตกแต่งชิ้นงานง่าย และมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ
2. พอลิเมอร์มีน้ำหนักเบา มีความหนาแน่นต่ำ ทำให้ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์มีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับโลหะ ถึงแม้ว่าพอลิเมอร์มีความแข็งแรง (strength) และมอดุลัส (modulus) ต่ำกว่าโลหะ แต่พอลิเมอร์มีความหนาแน่นต่ำกว่า จึงทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงจำเพาะ (specific strength) และมอดุลัสจำเพาะ (specific modulus) ซึ่งเป็นสมบัติเชิงกลต่อน้ำหนักสูงกว่าโลหะ สมบัติข้อนี้ทำให้พอลิเมอร์มีประโยชน์เหนือโลหะในบางการใช้งาน เช่น ยานพาหนะ เครื่องบิน อุปกรณ์กีฬา ฯลฯ
3. พอลิเมอร์มีมากมายหลายชนิด มีลักษณะและสมบัติที่หลากหลายในช่วงกว้างและสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสม เช่น บางชนิดสามารถต้านทานการกัดกร่อน (corrosion)

สารเคมี (chemicals) หรือเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulators) พอลิเมอร์บางชนิดสามารถนำไฟฟ้าได้ เช่น พอลิอะซิทีลีน (Polyacetylene) พอลิไพร์รอล (Polypyrrole) ฯลฯ

4. พอลิเมอร์บางชนิดโดยเฉพาะบางมีความยืดหยุ่น (flexibility) ดีและมีสมบัติดูดซับพลังงานที่ได้รับ (energy absorbing) สามารถใช้ประโยชน์เป็นวัสดุรับแรงได้

5. พอลิเมอร์มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีสมบัติในช่วงกว้าง สามารถเลือกชนิดที่เหมาะสมกับการใช้งานได้

6. พอลิเมอร์มีลักษณะภายนอก (appearance) ที่ดีสามารถผลิตให้มีสีสนลวดลายสวยงาม นำใช้งาน

อย่างไรก็ดี พอลิเมอร์ก็มีข้อจำกัดบางประการ กล่าวคือ

1. สามารถใช้งานได้ในอุณหภูมิที่จำกัด พอลิเมอร์จะเสียสภาพเมื่อใช้งานในอุณหภูมิที่สูง หรือต่ำเกินไป เช่น เทอร์โมพลาสติก (PE, PP ฯลฯ) นิ่มตัว หรือหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงมาก (สูงเกิน T_m) ส่วนยาง (NR, BR, SBR ฯลฯ) แข็งคล้ายแก้วถ้าใช้งานที่อุณหภูมิต่ำมาก (ต่ำกว่า T_g)

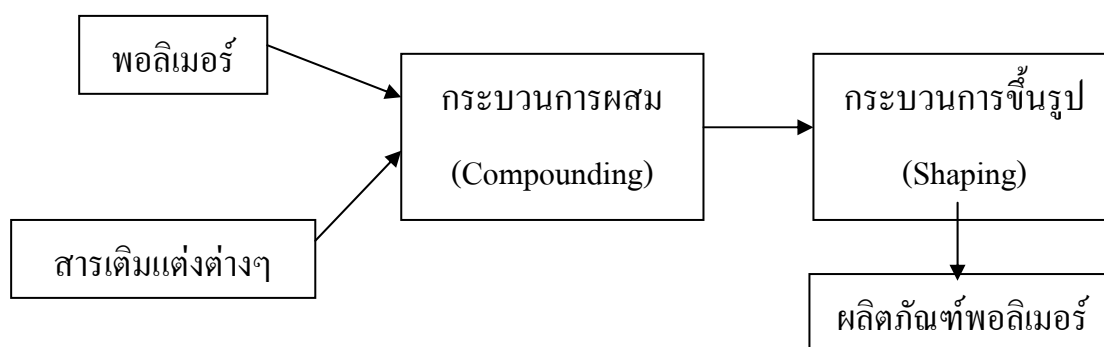
2. พอลิเมอร์มีสมบัติที่ขึ้นกับเวลา (time-dependent properties) จะมีสมบัติที่แตกต่างกันไป เมื่อเวลาผ่านไป เช่น การคืบ (creep) การคลายความเค้น (stress relaxation) ฯลฯ

ปัจจุบันมีการพัฒนาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์เพื่อพัฒนาสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่ดีขึ้น ใช้งานได้หลากหลายขึ้น เช่นเพิ่มสมบัติทางกล ทนอุณหภูมิใช้งานสูงขึ้น ง่ายต่อการขึ้นรูป และมีอายุการใช้งาน (service life) ที่ยาวนานขึ้น เป็นต้น

1.3 การขึ้นรูปพอลิเมอร์

การขึ้นรูปพอลิเมอร์หรือกระบวนการแปรรูปพอลิเมอร์เป็นวิธีการผลิต (ขึ้นรูป) ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์จากพอลิเมอร์บริสุทธิ์ที่เป็นเม็ด (pellet) หรือเป็นผง ให้ชิ้นงานผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่มีรูปร่างลักษณะต่างๆที่สามารถใช้งานหรือใช้ประโยชน์ได้ โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปต่างๆ เช่น การอัดรีด (extrusion) การฉีดขึ้นรูป (injection molding) การฉีดเป่าขึ้นรูป (injection blow molding) การอัดรีดเป่าขึ้นรูป (extrusion blow molding) การรีด (calendering) การอัดขึ้นรูป (compression molding) การอัดถ่ายแบบขึ้นรูป (transfer molding) เทอร์โมฟอร์มมิง (thermoforming) เป็นต้น การเลือกใช้เทคนิคการขึ้นรูปใดนั้นมีปัจจัยที่ต้องพิจารณาหลายประการ เช่นรูปร่างลักษณะของผลิตภัณฑ์ ชนิดของพอลิเมอร์ ความยากง่ายในการผลิตและต้นทุนการผลิต ขั้นตอนการขึ้นรูปเริ่มจาก

การนำพอลิเมอร์บริสุทธิ์มาผสมกับสารเติมแต่งต่างๆ เช่น สารเพิ่มเนื้อ (fillers) สารให้สี (colorants) สารช่วยผสม (compatibilizers) พลาสติไซเซอร์ (plasticizers) สารหล่อลื่น (lubricants) สารเพิ่มเนื้อชนิดเสริมแรง (reinforcing fillers) ฯลฯ โดยใช้เครื่องผสม (mixers) แบบต่างๆ เช่น เครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) เครื่องผสมภายใน (internal mixers) สารเติมแต่งที่ใช้เหล่านี้จะทำหน้าที่หลายประการ เช่น ช่วยให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น (processability) ช่วยเพิ่มสมบัติบางประการของผลิตภัณฑ์สุดท้าย (product properties) และช่วยลดต้นทุนการผลิต (cost) กระบวนการผสมพอลิเมอร์กับสารเติมแต่งนี้อาจเรียกว่าการคอมปาวด์ (compounding) เรียกว่าของผสมที่ได้ว่าพอลิเมอร์ผสมสูตรหรือคอมปาวด์ (compounds) จากนั้นจะนำพอลิเมอร์ผสมสารเติมแต่งต่างๆ มาผ่านกระบวนการขึ้นรูปที่กล่าวข้างต้น จนได้ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ออกมา กระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์สามารถสรุปได้ดังแผนภาพ ดังแสดงในภาพที่ 3 อย่างไรก็ตาม กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์มีหลายเทคนิคที่แตกต่างกัน บางกระบวนการอาจมีการควบรวมขั้นตอน หรือตัด/เพิ่ม แล้วแต่รายละเอียดของแต่ละกระบวนการผลิต



ภาพที่ 3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการขึ้นรูปพอลิเมอร์

2. พอลิเอทิลีน (Polyethylene)

พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยมอนอเมอร์สายโซ่ยาวของเอทิลีน (Ethylene) หรือตาม IUPAC คืออีเทน (Ethane) ซึ่งในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์จะถูกเรียกสั้นๆ ว่า PE และมีสูตรโมเลกุลคือ C_2H_4 และสูตรโครงสร้างดังภาพที่ 4 สถานะเป็นผง มีสีขาว และไม่มีกลิ่น จุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 85 องศาเซลเซียสถึง 130 องศาเซลเซียส หากเผาไหม้หรือสลายตัวจะเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ อะโครลีน (Acrolein) ฟอร์มาลดีไฮด์ ซึ่งถ้าสัมผัสทางหายใจ จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อเยื่อจมูก และทางเดินหายใจส่วนบน



ภาพที่ 4 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีน

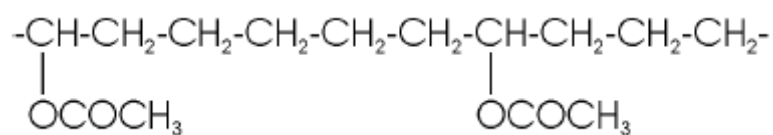
พอลิเอทิลีนถูกสร้างจากอีเทนผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) โดยสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายวิธี เช่น radical polymerization, anionic addition polymerization, ion coordination polymerization, cationic addition polymerization ซึ่งแต่ละกระบวนการจะได้ผลผลิตพอลิเอทิลีนต่างชนิดกันไป

การแบ่งชนิดของพอลิเอทิลีนจะขึ้นกับค่าความหนาแน่นและลักษณะของกิ่ง (branching) และน้ำหนักโมเลกุลเป็นหลัก โดยสามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้

1. Ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) ใช้ผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น bearing, gears
2. Ultra low molecular weight polyethylene (ULMWPE - PE-WAX)
3. High molecular weight polyethylene (HMWPE)
4. High density polyethylene (HDPE) ใช้ผลิตในอุตสาหกรรมเป็นขวดพลาสติก ถังขยะ
ท่อน้ำ
5. High density cross-linked polyethylene (HDXLPE)
6. Cross-linked polyethylene (PEX) ใช้ในอุตสาหกรรมประเภทท่อน้ำ
7. Medium density polyethylene (MDPE) ใช้สำหรับ packaging film, carrier bags, screw closures
8. Low density polyethylene (LDPE) ใช้ทำถุงพลาสติก ของเล่น film wrap
9. Linear low density polyethylene (LLDPE)
10. Very low density polyethylene (VLDPE) ใช้เป็นถุงเก็บความเย็น ถุงใส่อาหาร

3. เอทิลีน ไวนิล อะซิเตท (Ethylene vinyl acetate, EVA)

เอทิลีน ไวนิล อะซิเตทหรือเรียกสั้นๆว่า EVA เป็นโคพอลิเมอร์ของเอทิลีน (Ethylene) และไวนิล อะซิเตท (Vinyl acetate) โดยมีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไวนิล อะซิเตทประมาณ 10 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ และเป็นพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติคล้ายกับยางหรืออีลาสโตเมอร์ (elastomers) แต่ยังจัดเป็นประเภทเทอร์โมพลาสติก มีจุดหลอมเหลวประมาณ 80 ถึง 90 องศาเซลเซียส โดยมีสูตรโครงสร้างโมเลกุลดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท

เอทิลีน ไวนิล อะซิเตทมักถูกประยุกต์ใช้ในวิศวกรรมชีวภาพ (biomedical engineering) โดยใช้เป็นอุปกรณ์ขนส่งยา นอกจากนี้ยังใช้ใส่ในรองเท้าเพื่อรองรับแรงกระแทก ใส่ในผ้าขูด เพื่อป้องกันการรั่วไหลของแก๊สภายในขวด นอกจากนี้ผู้คนส่วนใหญ่จะรู้จัก EVA ในชื่อ expanded rubber หรือ foam rubber

4. วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Materials, PCMs)

4.1 ทฤษฎี

Phase Change Materials (PCMs) คือ วัสดุที่มีค่าความร้อนแฝงที่จุดหลอมเหลว (heat of fusion, λ) สูงและมีช่วงอุณหภูมิที่หลอมเหลวหรือกลายเป็นของแข็งค่อนข้างคงที่ ซึ่งมีผลทำให้ในช่วงที่มีการเปลี่ยนสถานะของสาร PCM จะมีความสามารถในการกักเก็บพลังงานหรือปลดปล่อยพลังงานได้ในปริมาณมากในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ PCM ได้รับความสนใจในการทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงานความร้อน เนื่องจากสามารถเก็บสะสมพลังงานความร้อนได้สูง โดยหลักการทำงานของวัสดุ PCM คือจะเกิดการเปลี่ยนสถานะเมื่อมีการเก็บสะสมหรือปลดปล่อยพลังงานความร้อน เช่น การเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลว (solid to liquid PCM) หรือการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นแก๊ส (liquid to gaseous PCM) ซึ่งโดยทั่วไปแล้ววัสดุ PCM นิยม

ใช้การเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลวมากกว่า เพราะเมื่อเกิดการเปลี่ยนสถานะจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อย และในหนึ่งรอบการทำงานของ PCM นั้นจะประกอบด้วยการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลวและการคืนสภาพจากของเหลวกลายเป็นของแข็งอีกครั้งหนึ่ง ในช่วงแรกของการใช้งาน Solid-Liquid PCM จะแสดงคุณสมบัติเหมือนวัสดุทั่วไป กล่าวคือ เมื่อวัสดุได้รับความร้อนจะมีการดูดความร้อนและเพิ่มอุณหภูมิ เมื่อ PCM เพิ่มอุณหภูมิจนถึงช่วงอุณหภูมิที่สารเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว (จุดหลอมเหลว) แล้ว PCM จะสามารถดูดพลังงานในปริมาณมากโดยที่ PCM จะไม่เปลี่ยนอุณหภูมิ และในทิศทางตรงข้าม หากเราใช้ PCM ในการให้ความร้อน เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมต่ำกว่าอุณหภูมิของ PCM วัสดุ PCM จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งและปลดปล่อยพลังงานความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะที่เก็บไว้ออกมาสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากการใช้ประโยชน์จากค่าพลังงานปริมาณมากในช่วงที่มีการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวหรือของเหลวเป็นของแข็ง (จุดหลอมเหลว) ของ PCM ดังนั้นช่วงอุณหภูมิที่มีการดูดสะสมพลังงานหรือปลดปล่อยพลังงานนั้นจะค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุทั่วไป เช่น น้ำ วัสดุก่อสร้าง หรือหินแล้ว สาร PCM สามารถเก็บกักความร้อนต่อหน่วยปริมาตรไว้ได้มากกว่า 5-14 เท่าของวัสดุทั่วไป เช่น อิฐ หิน หรือน้ำ เป็นต้น ขึ้นอยู่กับชนิดของสาร สารที่เป็น PCM ส่วนใหญ่จะเป็นสารประเภท Salt hydrates, Fatty acids, Ester และขี้ผึ้งพาราฟิน คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการเก็บสะสมพลังงานความร้อนแบบ Sensible Heat (หินและน้ำ) และ Latent Heat (สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์) ได้ถูกเปรียบเทียบไว้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการเก็บสะสมพลังงานความร้อน

Property	Rock	Water	Organic PCM	Inorganic PCM
Density, kg/m ³	2,240	1,000	800	1,600
Specific Heat, kJ/kg	1.0	4.2	2.0	2.0
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

4.2 คุณสมบัติของ PCMs

PCM ที่ถูกนำมาใช้ในการเก็บสะสมพลังงานความร้อนนั้น ควรพิจารณาคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. คุณสมบัติทางความร้อน (thermal properties) PCM ที่ดีควรมีคุณสมบัติทางความร้อนดังนี้

ก. อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะหรือจุดหลอมเหลว (phase change temperature or melting point) ควรเหมาะสมกับการใช้งาน

ข. มีค่าความร้อนแฝงสูงเพื่อให้เพียงพอต่อการเก็บสะสมพลังงานความร้อน

ค. นำความร้อนได้ดีทั้งในสถานะของแข็งและของเหลวเพื่อที่จะสามารถดูดพลังงานความร้อนและคายพลังงานความร้อนได้อย่างสมบูรณ์

ง. มีค่าความจุความร้อนสูงเพื่อที่จะได้เพิ่มความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานความร้อนแบบ sensible heat

2. คุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) PCM ที่ดีควรมีคุณสมบัติทางกายภาพดังนี้

ก. มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นระหว่างการเปลี่ยนสถานะต่ำ ในกรณีที่ PCM ถูกใช้ในระบบปิด เช่น มีการบรรจุในภาชนะหรือแคปซูลก่อนที่จะนำไปใช้งานการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของวัสดุเปลี่ยนสถานะจะมีความสำคัญมาก เพราะจะมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุ ซึ่งหากปริมาตรมีการขยายเพิ่มขึ้นอาจทำให้ภาชนะหรือแคปซูลเกิดความเสียหายได้

ข. มีความหนาแน่นสูง

ค. ไม่เกิดปัญหา supercooling หรือ undercooling ในการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็งเพราะการเกิด supercooling จะทำให้ PCM เปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งทำให้ไม่สามารถนำความร้อนที่ PCM สะสมไว้มาใช้ในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการได้

3. คุณสมบัติทางเคมี (chemical properties) PCM ที่ดีควรมีคุณสมบัติทางเคมี ดังนี้

ก. มีความเสถียรภาพ (stability)

ข. ไม่เกิด phase separation

ค. ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน (corrosiveness)

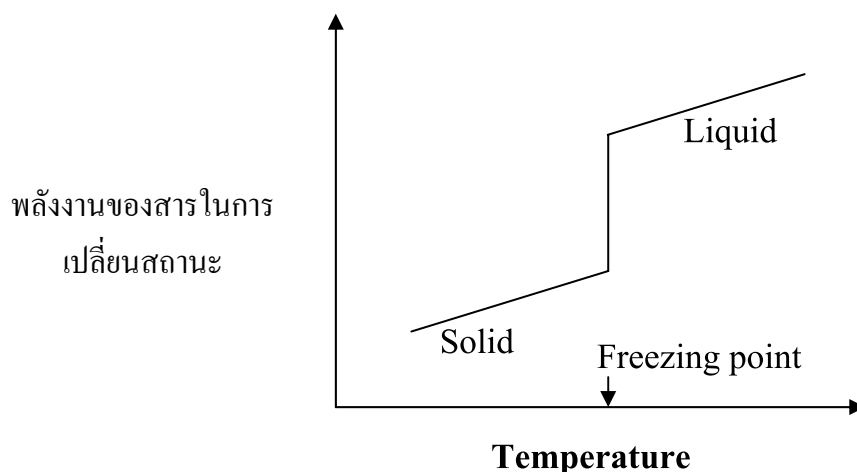
ง. ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ ไม่ระเบิด

4.3 ชนิดของ PCMs

PCMs แบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ ดังนี้

1. สารอนินทรีย์ (Inorganic PCMs) ประกอบด้วย เกลือไฮเดรต (salt hydrates) เกลือ (salts) โลหะ (metals) และโลหะผสม (alloys) สารอนินทรีย์มีค่าความร้อนแฝงสูง จึงทำให้สามารถเก็บสะสมพลังงานความร้อนได้มาก จากคุณสมบัตินี้ทำให้สารอนินทรีย์ได้รับความสนใจในการนำมาใช้เป็นวัสดุ PCM อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่า สารอนินทรีย์มีข้อเสียที่เกิด supercooling ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้การคายความร้อนของวัสดุ PCM ชนิดนี้ทำได้ไม่ดีนัก ปัจจุบันมีการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาวิธีแก้ไขปัญหาดังกล่าวพบว่า สารอนินทรีย์สามารถหลีกเลี่ยงการเกิด supercooling ได้ หากอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวไม่เกินอุณหภูมิหลอมเหลวของสารอนินทรีย์นั้นหรืออาจเติมสาร Nuclei เพิ่มลงไปในสารอนินทรีย์นั้นเพื่อช่วยให้เกิดการกลายเป็นของแข็งได้ง่ายขึ้น ตัวอย่างสารอนินทรีย์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุ PCM แสดงดังตารางที่ 2

2. สารอินทรีย์ (Organic PCMs) ประกอบด้วยขี้ผึ้งพาราฟิน (paraffin wax) พอลิแอลกอฮอล์ (polyalcohol) และกรดไขมัน (fatty Acids) แม้ว่าสารอินทรีย์จะมีค่าความร้อนแฝงน้อยกว่าสารอนินทรีย์มาก แต่สารอินทรีย์ก็ได้รับความนิยมมากกว่าสารอนินทรีย์ เพราะมีข้อดีหลายประการ เช่น ไม่เกิดปัญหา supercooling ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน (non corrosive) และไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น อย่างไรก็ตามสารอินทรีย์ก็มีข้อเสียเช่นกัน เช่น ติดไฟ (inflammability) และนำความร้อนได้ต่ำ (low thermal conductivity)



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับพลังงานของสารในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว

จากภาพที่ 6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับพลังงานของสารในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว (phase change) จะเห็นได้ว่าช่วงที่มีการเปลี่ยนสถานะจะต้องมีการเพิ่มพลังงานของสารในรูปความร้อนแฝงแต่อุณหภูมิคงเดิม

Belen *et al.* ได้ทำการรวบรวมสารที่มีคุณสมบัติเป็นสาร PCM ข้อมูลค่าคุณสมบัติต่างๆของสาร และจัดแบ่งประเภทของ PCM หมวดหมู่ และเสนอการจัดแบ่ง PCM ออกเป็น 2 ประเภทคือ

1) สารเชิงพาณิชย์และไม่เชิงพาณิชย์

มีสารหลายชนิดที่มีการศึกษาและมีความเป็นไปได้ที่จะเป็นสารที่มีคุณสมบัติ PCM แต่ในจำนวนนั้นมีเพียงส่วนน้อยที่สามารถนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ ตารางที่ 2-4 จะแสดงชื่อสารต่างๆ เช่น สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ หรือกรดไขมัน ที่มีผู้วิจัยหลายๆท่านได้ทำการศึกษาและสรุปว่าสารเหล่านี้มีคุณสมบัติที่จะสามารถนำมาใช้เป็น PCM ได้ โดยในตารางจะแสดงถึงคุณสมบัติทางความร้อนของสาร เช่น จุดหลอมเหลว ค่าความร้อนแฝง ค่าการนำความร้อน และค่าความหนาแน่น เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการแสดงข้อมูลสำคัญอื่นๆ เช่น congruent/incongruent melting volume change และค่าความจุความร้อน เป็นต้น

ตารางที่ 2 แสดงรายชื่อของสาร PCM ที่ผลิตออกมาในเชิงพาณิชย์และแสดงค่าคุณสมบัติทางความร้อนของสารแต่ละตัวซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากบริษัทผู้ผลิต เช่น จุดหลอมเหลว ความร้อนแฝงในการหลอมเหลว ค่าความหนาแน่น นอกจากนี้ยังแสดงชื่อบริษัทผู้ผลิตสาร PCM เหล่านี้อีกด้วย

2) สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

สารที่คุณสมบัติเป็น PCM มีทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ในตารางที่ 6 จะแสดงการเปรียบเทียบข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่นำมาใช้ประโยชน์เป็นสาร PCM

ตารางที่ 2 ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติ PCMs

สาร	จุดหลอมเหลว (°C)	ความร้อนแฝงในการ หลอมเหลว (kJ/kg)	ค่าการนำความร้อน (W/m.K)
Paraffin wax	64	173.6 266	0.167 (liquid, 63.5°C) 0.346 (solid, 33.6°C) 0.339 (solid, 45.7°C)
Polyglycol E6000	66	190.0	n.a.
Naphthalene	80	147.7	0.132 (liquid, 83.8°C) 0.342 (solid, 49.9°C) 0.310 (solid, 66.6°C)
Erythritol	118.0	339.8	0.326 (liquid, 140°C) 0.733 (solid, 20°C)
53%Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O+ 47%Al(NO ₃) ₂ ·9H ₂ O	61	148	n.a.

ที่มา: Belen *et al.* (2002)

ตารางที่ 3 ตัวอย่างสารอนินทรีย์ที่มีคุณสมบัติ PCMs

สาร	จุดหลอมเหลว (°C)	ความร้อนแฝงในการ หลอมเหลว (kJ/kg)	ค่าการนำความร้อน (W/m.K)
H ₂ O	0	333 334	0.612 (liq., 20°C) 0.61 (30°C)
Na ₂ S ₂ O ₃ .5H ₂ O	48	201 209.3	n.a.
Na(CH ₃ COO).3H ₂ O	58 58.4	264 226	n.a.
(NH ₄)Al(SO ₄).6H ₂ O	95	269	n.a.
NaOH	64.3	227.6	n.a.

ที่มา: Belen *et al.* (2002)

ตารางที่ 4 ตัวอย่างกรดไขมันที่มีคุณสมบัติ PCMs

สาร	จุดหลอมเหลว (°C)	ความร้อนแฝงในการ หลอมเหลว (kJ/kg)	ค่าการนำความร้อน (W/m.K)
Propyl palmitate	10	189	n.a.
Stearic acid	69 60-61 70	202.5 186.5 203	0.172 (liquid, 70°C)
Butyl stearate	19	140 123-200	n.a.
Lauric acid	42-44	178 177.4	0.147 (liquid, 50°C)
Palmitic acid	61-64	185.4 203.4 187	0.162 (liq., 68.4°C) 0.159 (liq., 80.1°C) 0.165 (liq., 80°C)

ที่มา : Belen *et al.* (2002)

ตารางที่ 5 ตัวอย่างสาร PCMs ที่วางขายในเชิงพาณิชย์

ชื่อสาร	ชนิดของ ผลิตภัณฑ์	จุด หลอมเหลว (°C)	ความร้อนแฝง ในการ หลอมเหลว (kJ/kg)	ค่าความ หนาแน่น (kg/m ³)	จำหน่ายโดย
SN33	Salt solution	-33	245	1.24	Cristopia
ClimSel C 7	n.a.	7	130	n.a.	Climator
TH29	Salt hydrate	29	188	n.a.	TEAP
RT65	Paraffin	64	207	n.a.	Rubitherm GmbH
RT110	Paraffin	112	213	n.a.	Rubitherm GmbH

ที่มา: Belen *et al.* (2002)

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบความสามารถในการเก็บกักความร้อนของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

	สารอินทรีย์	สารอนินทรีย์
ข้อได้เปรียบ	ไม่เกิดการกัดกร่อน แทบจะไม่หรือไม่ต้อง undercooling มีสมบัติทางเคมีหรือความร้อนที่เสถียร	ใช้พลังงานสูงในการเปลี่ยนสถานะ
ข้อเสียเปรียบ	ใช้พลังงานต่ำกว่าในการเปลี่ยนสถานะ ค่าการนำไฟฟ้าต่ำ ลุกติดไฟง่าย	เกิดการกัดกร่อน ต้อง undercooling คุณสมบัติทางความร้อนที่ไม่เสถียร

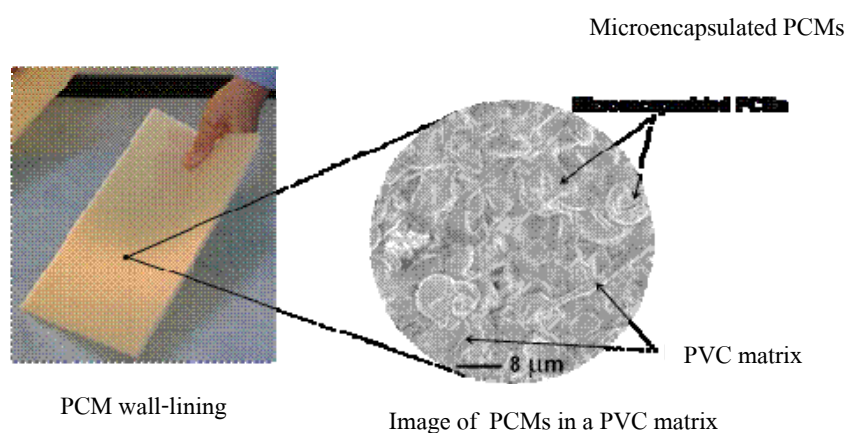
ที่มา: Belen *et al.* (2002)

4.4 การใช้ประโยชน์

การนำ PCM มาใช้ประโยชน์มักจะนำมาบรรจุภาชนะขนาดเล็ก บางๆ เพื่อลดการเกิด static head ภาชนะบรรจุควรจะนำความร้อนได้ดีและทนทานเพียงพอสำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของสาร PCM ขณะเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ภาชนะบรรจุไม่ควรเกิดการรั่วไหลและต้องทนทานต่อการกัดกร่อน โดยส่วนใหญ่จะใช้เหล็กและโพลีเอทิลีน มาทำเป็นภาชนะบรรจุสาร PCM การใช้ประโยชน์จากสาร PCM แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ป้องกันความร้อน และ ผลิตภัณฑ์เก็บกักความร้อน ส่วนที่แตกต่างกันของการใช้งาน PCM ทั้ง 2 ประเภทคือ คุณสมบัติการนำความร้อนของสาร PCM ผลิตภัณฑ์ป้องกันความร้อนเหมาะสมที่จะเลือกใช้สาร PCM ที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ แต่หากเป็นผลิตภัณฑ์เก็บกักความร้อน การที่สาร PCM มีค่าการนำความร้อนต่ำจะก่อให้เกิดปัญหาตามมา กล่าวคือ ในการใช้งานจะเกิดปริมาณความร้อนมากพอที่จะให้สาร PCM กักเก็บ แต่ความสามารถในการส่งผ่านความร้อนเข้าไปเก็บจะน้อยมากปัจจุบันสาร PCM ได้ถูกพัฒนามาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆและขายในเชิงพาณิชย์ ตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากสาร PCM โดยแบ่งเป็นประเภทต่างๆมีดังนี้

1) การก่อสร้าง

คณะวิจัยของมหาวิทยาลัย Brighton ได้ใช้สาร PCM เป็นส่วนผสมอยู่ใน vinyl Sheets เพื่อผลิตเป็นผนังเก็บกักความร้อน (thermal energy storage wall-lining) โดยผนังนี้จะสามารถทำให้อุณหภูมิภายในห้องไม่ร้อนจนเกินไป และรักษาอุณหภูมิให้คงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงมากอีกด้วย แสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แผ่นผนังเก็บกักความร้อนที่ใช้สาร PCM ผสมกับ vinyl sheets
ที่มา: University of Brighton (2002)

นอกจากนี้ ยังได้มีการใช้สาร PCM มาเป็นส่วนประกอบสำคัญในการสร้างบ้าน ที่บ้านของคุณ David Allam ซึ่งตั้งอยู่ในรัฐ Utah สหรัฐอเมริกาได้มีการใช้ sodium sulfate deca-hydrate ($\text{NaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เกลือ glauber เป็นสาร PCM ที่มีประสิทธิภาพดีตัวหนึ่งมาเป็นสารทำความร้อนแก่บ้าน คุณสมบัติของเกลือ glauber คือ มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 90 องศาฟาเรนไฮต์ (32.4 องศาเซลเซียส) และมีค่าความร้อนประมาณ 83 แคลอรีต่อกรัม จึงไม่ต้องใช้เกลือชนิดนี้ปริมาณมากในการให้ความร้อนภายในบ้าน เกลือจะถูกบรรจุอยู่ในท่อ ซึ่งจะสามารถเก็บกักความร้อนของดวงอาทิตย์ในเวลากลางวัน ในขณะที่เกลือได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์นี้เกลือจะหลอมละลายกลายเป็นของเหลว ส่วนในเวลากลางคืนเกลือก็จะเริ่มแข็งตัวและปล่อยความร้อนออกมาจำนวนมากในขณะที่เปลี่ยนสถานะกลับมาเป็นของแข็งที่อุณหภูมิ 90 องศาฟาเรนไฮต์ ทำให้เกิดความอบอุ่นภายในบ้านแม้จะตั้งอยู่ในเขตภูมิอากาศหนาวเย็นโดยไม่ต้องใช้เชื้อเพลิง แสดงในภาพที่ 8



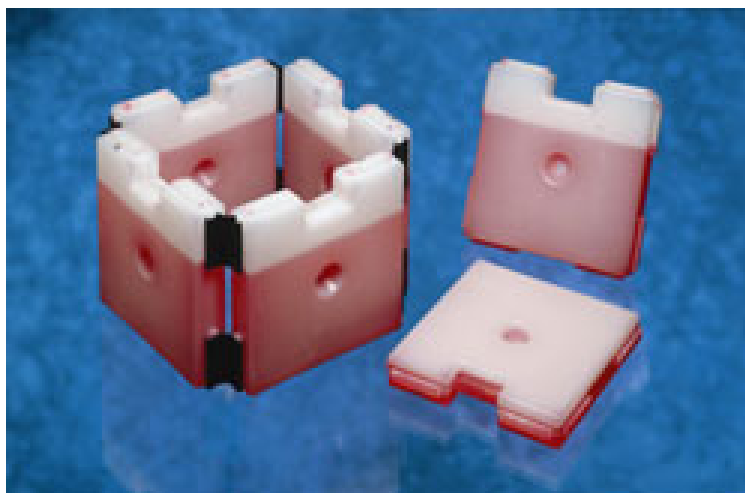
ภาพที่ 8 บ้านของ David Allan ที่ใช้ PCM มาเป็นสารที่ให้ความอบอุ่นภายในบ้านในเวลากลางคืน

ที่มา: Allanstime David Allan's Solar Home (2005)

2) การขนส่งและบรรจุภัณฑ์

ในเว็บไซต์ <http://www.packexpo.com> ซึ่งเป็นเว็บไซต์ที่รวบรวมเทคโนโลยีเกี่ยวกับบรรจุภัณฑ์จากทั่วโลก ได้มีการยกตัวอย่างบรรจุภัณฑ์ที่ชื่อว่า TCP (Thermal Control Panel) ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ TCP นี้เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบหลักเป็นสาร PCM ซึ่งมีจุดหลอมเหลวอยู่

ที่ 5 องศาเซลเซียส บรรจุภัณฑ์ชนิดนี้จะอำนวยความสะดวกในการขนส่งผลิตภัณฑ์ที่ต้องรักษา ระดับอุณหภูมิให้คงที่ขณะขนส่ง เช่น ผลิตภัณฑ์แช่แข็งชนิดต่างๆ โดยบรรจุภัณฑ์ชนิดนี้จะ สามารถรักษาระดับอุณหภูมิไว้ที่ 2-8 องศาเซลเซียสได้เป็นเวลานานถึง 48 ชั่วโมง



ภาพที่ 9 บรรจุภัณฑ์ TCP (Thermal Control Panel)

ที่มา: บริษัท Packexpo (2005)

3) เสื้อให้ความเย็น

การนำสาร PCM มาบรรจุในเสื้อ กลายเป็นเสื้อให้ความเย็น (cooling vest) ผลิตภัณฑ์ จาก PCM รูปแบบนี้ทำออกมาเป็นเชิงพาณิชย์กันอย่างกว้างขวาง เช่น บริษัท Cool Vest บริษัท Texas Cool Vest และบริษัท ClimaTech เป็นต้น โดยภายในเสื้อดังที่แสดงในภาพที่ 10 ภายในจะ ประกอบด้วยถุงที่บรรจุสาร PCM ไว้เพื่อดูดซับความร้อนจากภายนอกตัวเสื้อและให้ความเย็นแก่ ร่างกายผู้ที่สวมใส่ โดยเหมาะสำหรับผู้ที่ต้องทำงานในพื้นที่ที่มีอากาศร้อน เช่น ทหาร คนงาน ก่อสร้าง หรือนักกีฬาแข่งรถยนต์ เป็นต้น อุณหภูมิที่เสื้อนี้รักษาไว้ให้คงที่ขึ้นอยู่กับแต่ละแบบแต่ละ บริษัทผู้ผลิตเสื้อโดยมีให้เลือกในหลายๆช่วงอุณหภูมิ รวมถึงระยะเวลาที่เสื้อจะสามารถรักษาไว้ได้ อีกด้วย



ภาพที่ 10 เสื้อให้ความเย็น (cooling vest) ของบริษัท ClimaTech
ที่มา: บริษัท climatechsafety (2005)

3) ผลิตภัณฑ์อื่นๆ

ตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากสาร PCM ที่กล่าวไว้ในบทความต่างๆ

- ก. ความปลอดภัย: รักษาระดับอุณหภูมิในห้องคอมพิวเตอร์
- ข. เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร อาหาร ไวน์ ผลิตภัณฑ์จากนม
- ค. รักษาอุณหภูมิในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
- ง. ด้านการแพทย์: การขนส่งเลือด โต๊ะปฏิบัติการทางการแพทย์
- จ. ให้ความเย็นแก่เครื่องยนต์ (ทั้งความร้อนจากไฟฟ้าและการเผาไหม้)
- ฉ. ลดอุณหภูมิเนื่องจากการคายพลังงานจากปฏิกิริยาเคมี
- ช. ระบบความร้อนในยานอวกาศ
- ซ. โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน

5. PCM ในกำแพงคอนกรีตหรือผนังยิปซัม

ตึกอาคารที่มีกำแพงคอนกรีตหนาในปัจจุบันถูกใช้สะสมพลังงานความร้อน เพื่อความสะดวกสบายในการใช้งานของแต่ละห้องของอาคาร หากเทียบกับกำแพงคอนกรีตที่มีขนาดบาง เมื่ออุณหภูมิอากาศร้อนในช่วงฤดูร้อน แสงอาทิตย์ส่องแสงลงบนกำแพงและทะลุผ่านหน้าต่างของอาคาร อุณหภูมิภายในอาคารจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ด้วยปริมาณพลังงานความร้อนเพียงเล็กน้อย จะก่อให้เกิดความไม่สะดวกสบายในการอยู่อาศัยหากปราศจากเครื่องปรับอากาศ อย่างไรก็ตาม เมื่ออาคารที่มีกำแพงคอนกรีตหนา หากได้รับพลังงานความร้อนอย่างมากจากดวงอาทิตย์ กำแพงซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันความร้อน ความร้อนจึงมีการสะสมพลังงานในตัวกำแพงตลอดทั้งวัน พอช่วงเวลากลางคืนเมื่ออุณหภูมิภายนอกต่ำลงความร้อนจากกำแพงจะถูกถ่ายเทสู่อากาศภายนอกที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า กำแพงหนาจะยังมีประโยชน์ในด้านอื่นๆ ได้ เช่น เมื่ออากาศภายนอกมีอุณหภูมิลดลงในช่วงฤดูหนาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเวลากลางคืน ภายในบ้านเรือนจะต้องการความร้อนเพื่อความอบอุ่น ดังนั้น จึงมีการนำเอาไม้มาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อสร้างความอบอุ่นภายในบ้านเรือน และเพื่อที่จะลดการใช้ไม้มาเป็นเชื้อเพลิง จึงมีการคิดค้นนำเอาพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้แทน โดยเมื่อดวงอาทิตย์ส่องแสงตลอดวันก็กักมันตภาพรังสีจากดวงอาทิตย์ซึ่งมากระทบกับกำแพงจะถูกเปลี่ยนรูปกลายเป็นความร้อน พลังงานความร้อนนี้จึงถูกสะสมขึ้นในกำแพงคอนกรีต เพื่อปล่อยความร้อนออกมาภายในห้องเมื่อไม่มีพลังงานแสงอาทิตย์อย่างที่พบในช่วงกลางคืน อย่างไรก็ตาม การใช้กำแพงคอนกรีตที่มีความหนาและหนักจะไม่นิยมนักสำหรับการสร้างบ้าน เนื่องจากการก่อสร้างมีราคาสูง ดังนั้นจึงมีการคิดค้นที่จะสร้างมวลความร้อนที่หาได้ง่ายมีขนาดใหญ่ให้เป็นไปได้ โดยแนวทางที่เป็นไปได้คือการใช้ PCM ร่วมกับกำแพงคอนกรีตหรือผนังยิปซัม โดยเมื่อกำแพงคอนกรีตหรือผนังยิปซัมของบ้านทำการผสม PCM ลงไป กำแพงหรือผนังจะสามารถสะสมพลังงานความร้อนได้ ทำให้การใช้กำแพงที่มีความหนาจึงไม่มีความจำเป็น

5.1 ผนัง Wallboard ที่ผสม PCM

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 วัสดุจะมีค่าความจุความร้อนสูงกว่า

วิธีการเติมแวซในรูปแบบเกล็ดลงในผนังวอลบอร์ดในช่วงกระบวนการผลิต แบบจำลองการวิเคราะห์เพื่อควบคุมการเปลี่ยนสถานะของผนังวอลบอร์ดสำหรับการใช้ประโยชน์จาก passive solar application ได้ถูกประยุกต์ใช้ขึ้น

Shapio (1989) ได้แสดงให้เห็นว่า PCM 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 Neepor พบว่าการเก็บความร้อนของผนังวอลบอร์ดที่มีส่วนผสมของ PCM นั้นเพียงพอที่จะเก็บความร้อนจำนวนมากที่ได้รับโดยตรงจากแสงอาทิตย์

Salzer and Sircar (1990) ได้ค้นพบ linear alkyl hydrocarbon PCM จากการกลั่นปิโตรเลียม ซึ่งสารนี้มีความเหมาะสมเนื่องจากมีราคาถูกและได้มีการพัฒนาวิธีในการเติม PCM ลงในพลาสติกเตอร์บอร์ด (plasterboard) เพื่อลดการรั่วและปัญหาของการขยายตัวในขณะที่มีการหลอมละลายและการแข็งตัว กระบวนการที่ใช้ในการผสม PCM ลงไปในพลาสติกเตอร์บอร์ดนั้นทำได้ทั้งโดยการดูดซับ PCM เหลวเข้าไปในช่องว่างของพลาสติกเตอร์บอร์ดหลังกระบวนการผลิต หรืออาจจะเติม PCM ลงไปในขั้นตอนการผลิตในขณะที่พลาสติกเตอร์บอร์ดยังเปียกอยู่ ซึ่งพบว่าประสบความสำเร็จ

การสร้างผนังยิปซัมที่สามารถเก็บสะสมพลังงานความร้อนได้ในระดับห้องปฏิบัติการผลิตขึ้นโดยการเติม butyl stearate (BS) ที่มีความบริสุทธิ์ระดับเชิงการค้า (commercial grade) ปริมาณ 21-22 % ลงไปโดยตรงในขั้นตอนการผสมของกระบวนการผลิตผนังยิปซัมแบบเดิม การเติม BS ช่วยทำให้เกิดการกระจายตัวของสารทำลายเล็กน้อย โดยคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของวอลบอร์ดที่ผลิตได้จากห้องปฏิบัติการเมื่อเปรียบเทียบกับแล้วมีคุณสมบัติไม่แตกต่างจากผนังยิปซัมมาตรฐาน ความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานของบอร์ดที่ผลิตขึ้นพบว่า ความสามารถในการเก็บและปลดปล่อยพลังงานสูงกว่าการใช้ผนังยิปซัมอย่างเดียวถึง 10 เท่า

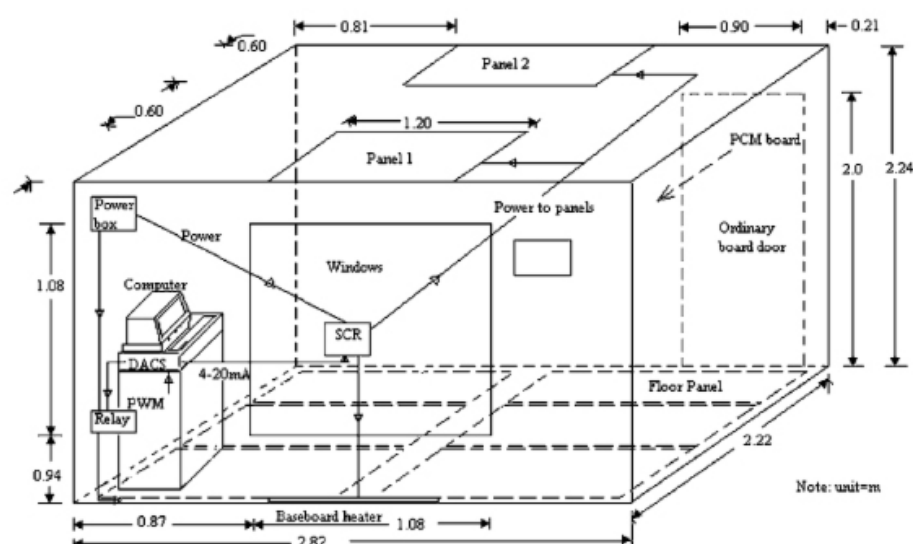
ผนังยิปซัมถือได้ว่าเป็นตัวกลางที่ดีที่สุดสำหรับ PCM ซึ่งประมาณ 41% ของวอลบอร์ดเป็นช่องว่างของอากาศ การทดสอบเบื้องต้นโดยวิธี scanning calorimetry test เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างกันเบื้องต้นของการทดลองในสเกลขนาดเล็กนั้น ได้คัดเลือก กรดไขมันจากมะพร้าว มาทำ

การทดสอบ PCM วอลล์บอร์ดขนาดเหมาะสมสำหรับห้องพักอาศัย เนื่องจากมันมีช่วงของการหลอมเหลวและเยือกแข็งที่น่าสนใจ (24.9 องศาเซลเซียส) ดังนั้นงานที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนา PCM วอลล์บอร์ดได้มีการทำการทดลองเพื่อแสดงให้เห็นว่าความคิดดังกล่าว สามารถนำมาใช้งานได้จริงกับการผลิตในสเกลขนาดใหญ่ และ PCM สามารถเข้าไปรวมและกระจายตัวภายในอาคาร ด้วยคุณสมบัติที่สำคัญในด้านการเก็บความร้อน

การจำลองรูปแบบพลังงานของอาคารช่วยในการประเมินศักยภาพของการนำ PCM มาประยุกต์ใช้เป็นตัวเก็บพลังงานภายในอาคาร โดย Fraunhofer Institute ได้จำลองพฤติกรรมที่เกิดจากความร้อนในองค์ประกอบของอาคาร เพื่อเปรียบเทียบการกระทำแบบไดนามิกของโครงสร้างของผนังชนิดต่างๆ ที่เกิดจากการเติมด้วย PCM ในปริมาณที่ต่างกัน โดยอาศัยเกณฑ์ที่ได้จากการสังเกตต้นแบบที่ถูกต้องของการเปลี่ยนแปลงสถานะ ต้นแบบจะได้รับการทดสอบอย่างถูกต้อง ด้วยการใช้เครื่องมือวัดสำหรับตัวอย่างผนังด้วยพื้นที่ 0.5×0.5 ตารางเมตร เขาได้วิเคราะห์ผลกระทบของช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสถานะและ สัดส่วนของ PCM และโครงสร้าง และการใช้อาคาร โดย thermographs จะแสดงถึงผลในเชิงคุณภาพของ PCM ที่มีอยู่ในวัสดุโครงสร้าง มีตัวอย่างผนัง 4 ตัวอย่างที่มีจำนวน PCM แตกต่างกัน ซึ่งถูกทำให้ร้อนในเตาอบ และหลังจากนั้นจึงมีการตรวจสอบในระหว่างที่อุณหภูมิเย็นตัว ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิกับเวลา แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงผลของการใช้ PCM และการเติม PCM ด้วยสัดส่วนที่สูงกว่ามีผลทำให้กระบวนการทำความเย็น (cooling process) เกิดขึ้นเป็นเวลานาน ดังในช่วงอุณหภูมิที่เห็นได้ชัดเจน มวลความร้อนขององค์ประกอบของอาคาร สามารถเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะ ดังนั้นอุณหภูมิที่ทำให้รู้สึกสบายในอาคารที่มีขนาดใหญ่ สามารถเกิดขึ้นได้ดีพอๆ กับวัสดุโครงสร้างมวลเบา

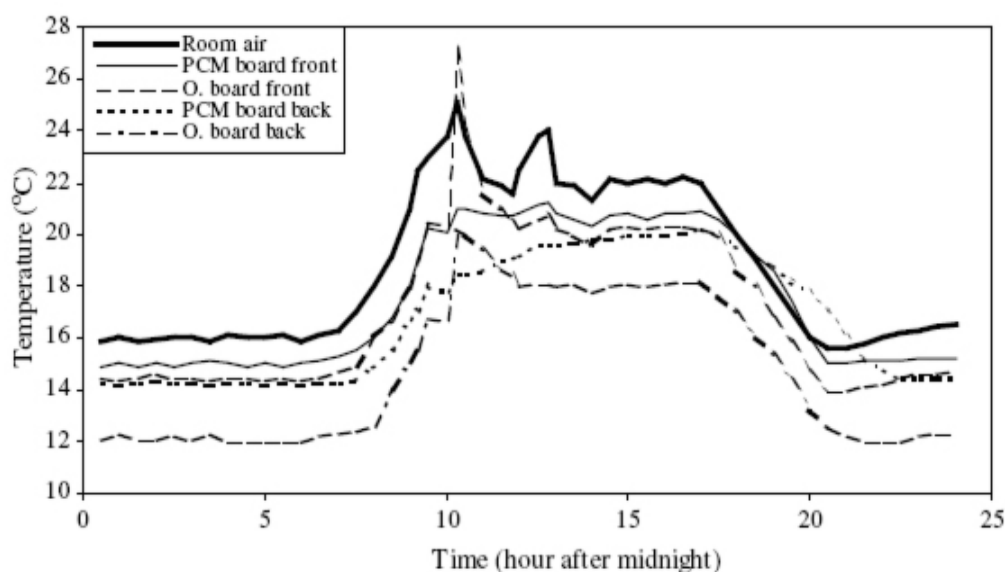
Athienitis *et al.* (1997) ได้ทำการทดลองสเกลใหญ่ และศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้กับห้องขนาดเท่าจริง ด้วยการบุ PCM ยิปซัมบอร์ดที่ผนังด้านในดังภาพที่ 11 PCM ยิปซัมบอร์ดที่นำมาใช้มีการเติมด้วย BS 25% โดยนักแบบจำลอง explicit finite difference model ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อจำลองกระบวนการส่งผ่านความร้อนในช่วงช่วงหัวค่ำของผนัง แบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นหนึ่งมิติของพวกเขาประสบความสำเร็จในการคาดเดาอุณหภูมิที่วัดได้ของผนังดังภาพที่ 12 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผนัง PCM ยิปซัมบอร์ดสามารถลดอุณหภูมิสูงสุดของห้องประมาณ 4 องศาเซลเซียส ตลอดช่วงเวลากลางวัน และช่วยลดการสูญเสียความร้อนในช่วงเวลากลางคืนได้อย่างมีนัยสำคัญ

Kissock *et al.* (1998) ได้นำเสนอผลการทดลองศึกษาเกี่ยวกับความร้อนที่ถูกดูดซับไว้บนผนังวอลล์บอร์ดได้ถึง 30 % โดยน้ำหนัก ด้วยการใช้ paraffin PCM (K18) ในโครงสร้างเบื้องต้น และในการใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยคณะวิจัยนี้ การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ อุณหภูมิที่อยู่ล้อมรอบและอุณหภูมิที่อยู่ในห้องที่ใช้ทดสอบจะถูกตรวจสอบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 14 วัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิสูงสุดในการเปลี่ยนสถานะของเซลล์ที่ทดสอบที่มากถึง 10 องศาเซลเซียส นั้นน้อยกว่าการทดลองควบคุมในช่วงที่มีแดดของวัน แบบจำลอง modified finite difference simulation สามารถที่จะใช้คาดเดาอุณหภูมิของผนังด้านในของเซลล์ที่ทดสอบด้วยความถูกต้องที่น่าเชื่อถือ (ค่าเฉลี่ยความผิดพลาด < 1.7 องศาเซลเซียส) โดยอาศัยพื้นฐานของการวัดคุณสมบัติและข้อมูลทางสิ่งแวดล้อม



ภาพที่ 11 แผนผังแสดงการติดตั้ง PCM gypsum board ของห้องทดสอบ

ที่มา: Kissock *et al.* (1998)



ภาพที่ 12 ผลการทดลองวันที่ท้องฟ้าโปร่งในช่วงฤดูหนาว (O. board denote ordinary board)
ที่มา: Kissock *et al.* (1998)

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของการประหยัดพลังงานได้ถูกนำเสนอโดย Tomlinson and Heberle (1990) ซึ่งเขาได้ประเมินถึงพลังงานความร้อนกับความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการใช้น้ำ PCM วอร์ลบอร์ด Stetiu and Fuestel (1996) ได้นำเสนอโปรแกรมจำลองพลังงานความร้อนของอาคารโดยอาศัยวิธีทาง finite difference เพื่อใช้ในการประมาณสมรรถภาพการสะสมความร้อนแฝงของ PCM วอร์ลบอร์ด มวลของความร้อนสามารถนำมาใช้เพื่อลดความต้องการพลังงานในช่วงสูงสุด และลดขนาดของระบบการทำความเย็นหรือระบบทำความร้อนลง PCM มีประโยชน์ที่สำคัญในฐานะที่เป็นตัวกลางในการสะสมพลังงาน คือสามารถเพิ่มขนาดของความจุความร้อน และสามารถปลดปล่อยออกมาด้วยอุณหภูมิที่เกือบคงที่ ซึ่งจากข้อได้เปรียบนี้ทำให้สามารถเก็บพลังงานได้เป็นจำนวนมาก โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ฉาบหุ้ม ดังนั้นแบบที่ใช้ข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ที่มีลักษณะเป็นตัวเลข สำหรับการปรับปรุงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะด้วยวัสดุผสม PCM มารวมกัน ได้ถูกพัฒนาขึ้น โดย Ma and Jin

Neeper (2000) ได้ทดสอบ thermal dynamic ของชิปซิลิคอนวอร์ลบอร์ดที่เติมด้วยกรดไขมันและจีฟังก์พาราฟิน ในฐานะที่เป็น PCM ที่ถูกนำมาทดสอบเพื่อดูความผันแปรของอุณหภูมิห้อง แต่จะไม่ได้รับพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์โดยตรง อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของ PCM เหล่านี้จะถูกปรับโดยการใช้กับส่วนประกอบอื่นๆ เขาได้ทดสอบปัจจัย 3 ปัจจัยของ PCM วอร์ลบอร์ดซึ่งอาจจะมีผลกับพลังงานที่สามารถดูดซับหรือปลดปล่อยในรอบวันคือ

- 1) อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของ PCM
- 2) ช่วงอุณหภูมิที่มากกว่าจุดหลอมเหลว
- 3) ความจุความร้อนแฝงต่อหน่วยพื้นที่ของวอลล์บอร์ด

จากการค้นคว้าพบว่า การเก็บสะสมพลังงานในช่วงเวลากลางวันจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่ออุณหภูมิจุดหลอมเหลวของ PCM ที่ผสมอยู่ในวัสดุโครงสร้างมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิห้องที่ทำให้รู้สึกสบาย การเก็บสะสมพลังงานในช่วงกลางวันจะลดลง ถ้าการเปลี่ยนแปลงสถานะเกิดขึ้นเกินกว่าช่วงอุณหภูมิ จากการประยุกต์ของ Keld คุณสมบัติของวอลล์บอร์ดซึ่งมี 10% โดยน้ำหนัก และ 20% โดยน้ำหนัก ของ otadecane ถูกนำไปใช้ในแบบจำลองของ Neeper เพื่อปรับปรุงรูปแบบและชนิดของผนัง และเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์การดูดและการปลดปล่อยพลังงานในแต่ละวันโดยใช้ผนัง PCM ที่ดีที่สุดสำหรับการเปลี่ยนแปลงแบบกลับไปกลับมา (sinusoidal) และแบบ square wave ในรอบวันของอุณหภูมิห้อง

5.2 กำแพงคอนกรีตที่ผสม PCM

Chahroudi (1976) ได้อธิบายเกี่ยวกับการใช้งานวัสดุจำพวก thermocrete materials ในรูปแบบทั่ว ๆ ไป โดยเทอร์โมคริต (thermocrete) คือตัวกลางในการสะสมความร้อนร่วมกับสาร PCM ในรูปแบบของ concrete matrix ซึ่งจะทำให้สามารถสะสมความร้อนได้อย่างทั่วถึง บล็อกเทอร์โมคริตได้ถูกวิเคราะห์โดยเจาะจงพิจารณาในรายละเอียดของการใช้งาน การระบุประสิทธิภาพ และการประหยัดพลังงานในการนำไปประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ วัสดุสะสมพลังงานความร้อน เทอร์โมคริต ถูกสร้างขึ้นด้วยการผสมสาร PCM ด้วยซีเมนต์ (pen cell cements) ก็จะได้วัสดุสะสมพลังงานความร้อนราคาถูกที่มีโครงสร้างและมีคุณสมบัติทางเทอร์โมพลาสติก

Hawes and Feldman (1992) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนของสาร PCM (BS, dodecanal, paraffin and tetradecanol) ในคอนกรีตบล็อกต่างชนิดกัน โดยในการศึกษาได้ครอบคลุมถึงผลกระทบของความเป็นต่างของคอนกรีต อุณหภูมิ เวลาที่ใช้และความเงาของสาร PCM ที่เกิดขึ้นกับการดูดซับของสาร PCM ในระหว่างกระบวนการจุ่มแช่ (impregnation) พวกเขาได้พิจารณาหลักของการดูดซับ และตั้งแนวทางในการพัฒนาโดยใช้การดูดซับสาร PCM อย่างคงที่ในคอนกรีต เพื่อให้ได้ค่าของการแพร่กระจายของสาร PCM ตามต้องการ และได้ค่าความสามารถในการสะสมความร้อนตามที่ต้องการ สิ่งที่ได้จากการปรับปรุงคอนกรีตโดยเทคนิคการผสมสาร PCM นี้ทำให้ความสามารถในการเก็บสะสมความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 300 %

วิธีการบรรจุสาร PCM ส่วนใหญ่ถูกศึกษาโดย Salyer *et al.* (1995) และนำมาใส่ในช่องว่างตรงกลางของบล็อกคอนกรีต โดยวิธีการ

1. การดูดสาร PCM เข้าไปในช่องว่างของวัสดุ
2. การผสมสาร PCM เข้าไปในสาร special silicas
3. การแทรกซึมสาร PCM เข้าไปใน Polymeric carriers

พวกเขาได้ศึกษาสาร PCM ในรูปแบบของ PCM melt-mix ผง PCM/Silica หรือ PCM/HDPE เมื่อใส่แทนที่เข้าไปในช่องว่างส่วนกลางของบล็อกคอนกรีต เพื่อให้ได้สาร PCM ที่มีปริมาณมาก และได้ค่าปริมาณความร้อนสะสมที่สูงขึ้น

Lee *et al.* (2000) ได้ศึกษาและแสดงให้เห็นถึงผลการทดสอบในระดับมาโครสเกล (macro-scale) ในการเปรียบเทียบสมรรถภาพการสะสมความร้อนของบล็อกคอนกรีตที่ผสมสาร PCM แตกต่างกันสองชนิด คือ BS และ Commercial paraffin (P) โดยบล็อกคอนกรีต 2 ชนิดได้ถูกนำมาทดสอบและเปรียบเทียบกัน Regular block (R) ที่ผลิตจากคอนกรีตของประเทศโปแลนด์ และ Autoclaved block (A) ซึ่งผลิตจากคอนกรีตของประเทศโปแลนด์ผสมกับซิลิกา การชุบทำโดยการจุ่มคอนกรีตร้อนๆ ลงใน PCM เหลว จนกระทั่งได้ PCM ที่ถูกดูดซับในคอนกรีต 3.9-8.6 % ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าบล็อกคอนกรีตจะสามารถเก็บสะสมความร้อนแฝง และความร้อนที่สามารถสัมผัสได้ ได้ดีเช่นเดียวกับความร้อนแฝงของคอนกรีต ด้วยวิธีนี้จะทำให้การทำความร้อนหรือความเย็นจากเครื่องใช้ทั่วไปจะถูกเลื่อนไปจากช่วงเวลาที่ต้องการการใช้พลังงานสูง (demand time)

Hadjieva *et al.* (2000) ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการชุบคอนกรีต แต่ใช้ sodium thiosulphate pentahydrate ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) เป็น PCM พวกเขาใช้คอนกรีตที่มีรูพรุนและมีช่องว่างมากกว่า 60% พวกเขาสรุปว่าช่องว่างสำหรับการดูดซับที่มีขนาดใหญ่ของคอนกรีตจะรองรับโครงสร้างของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ได้ดี และทำให้โครงสร้างมีเสถียรภาพระหว่างรอบของการให้ความร้อน

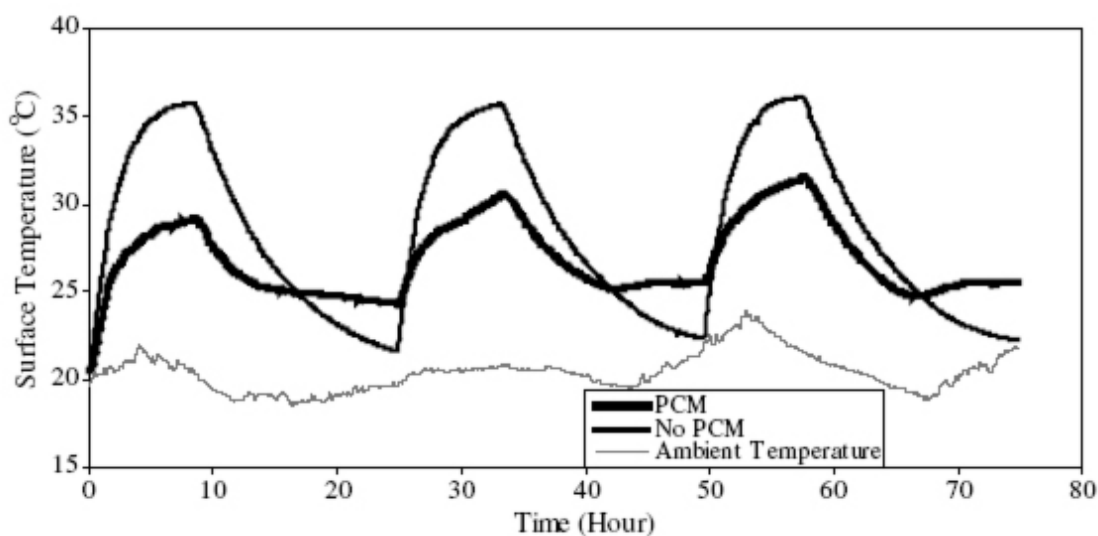
5.3 การให้ความร้อนใต้พื้นห้องด้วยการสะสมความร้อนแฝง

แนวทางพื้นฐานของการประยุกต์การเก็บสะสมความร้อนในอาคาร คือการทำให้พื้นอุ่น หรือระบบการสะสมความร้อนใต้พื้นห้อง โดยวิธีนี้จะต้องจัดหาพื้นผิวรับความร้อนขนาดใหญ่ไว้ที่พื้นห้องเพื่อที่จะสามารถสร้างความร้อนขนาด 100 วัตต์ต่อตารางเมตร หรือน้อยกว่า Athienitis

ได้พัฒนาแบบจำลองไม่เชิงเส้น อนุพันธ์อันดับสามแบบครือค่าย เพื่อศึกษาสมรรถภาพของระบบ ให้ความร้อนได้พื้นที่ห้องด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้น

Farid and Chen (1999) ได้พัฒนาแบบจำลองคอมพิวเตอร์ เพื่อจำลองการให้ความร้อนแก่ พื้นที่ห้องโดยปราศจากชั้นของ PCM สมมติว่าพื้นที่ถูกทำให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าที่คงที่สำหรับ 8 ชั่วโมงในช่วงเวลา off peak ของการใช้ไฟฟ้า แบบจำลองสำหรับพื้นที่คอนกรีตแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิที่พื้นห้องมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นๆลงๆ และคอนกรีตมีพลังงานสูญเสียมากทำให้เก็บความร้อนไว้ได้เพียงระยะเวลาสั้นๆหลังจากปิดเครื่องทำความร้อน แต่ในทางตรงกันข้ามแบบจำลอง สำหรับการปรับปรุงระบบที่ผสม PCM พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวต่ำกว่า และสามารถ ทำให้พื้นอุ่นอยู่ได้ตลอดทั้งวัน เช่นเดียวกับการค้นพบของ Amir *et al.* ผู้ซึ่งศึกษาสมรรถภาพของ พื้นที่คอนกรีต 2 กลุ่มที่บรรจุน้ำและ n-octadecane paraffin ลงไปในโครงสร้างของคอนกรีต Laouadi and Lacroxi ได้ศึกษาโดยใช้ทฤษฎีเช่นเดียวกัน ผลของแบบจำลองแสดงให้เห็นว่ากลุ่มของแผ่น คอนกรีตจะเก็บความร้อนและคายความร้อนในช่วงระหว่างวัน การสร้างกลุ่มคอนกรีตที่เหมาะสม จะช่วยให้ช่วงเวลา peak load อยู่ในช่วงตอนเช้าและตอนเย็น

Farid and Kong (2001) ได้สร้างแผ่นคอนกรีต 2 แผ่น ในแผ่นแรกจะผสม PCM โดยใช้ $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ผสมลงในพลาสติกทรงกลมที่ผลิตโดยบริษัท Cristo พลาสติกทรงกลมจะมีช่องว่าง ด้านในประมาณ 10 % เพื่อให้ PCM สามารถขยายตัวได้ในระหว่างการหลอมเหลว พลาสติกแข็งที่ถูก นำมาใช้ในการสร้างทรงกลม จะป้องกันความเค้นที่เป็นอันตรายที่จะเกิดขึ้นรอบๆ โครงสร้าง อย่างไรก็ตามมันจำเป็นที่จะสร้างความแข็งแรงทางกลของพื้นคอนกรีตด้วยการใส่พลาสติกทรง กลมที่บรรจุ PCM ลงไปก่อนที่จะหาวิธีปฏิบัติที่เหมาะสม และแผ่นที่สองเป็นแผ่นคอนกรีตเรียบ ธรรมดา สมรรถนะของแผ่นคอนกรีตทั้งสองแผ่นจะถูกทดสอบและนำมาเปรียบเทียบกัน มวล ความร้อนของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนจุดที่ใส่ PCM แผ่นคอนกรีตที่ผสม PCM จะเก็บ สะสมความร้อนสำหรับทั้งวันจากการให้ความร้อนเพียง 8 ชั่วโมง โดยคอนกรีตแผ่นเรียบจะสูญเสีย ความร้อนในไม่กี่ชั่วโมงดังแสดงในภาพที่ 13



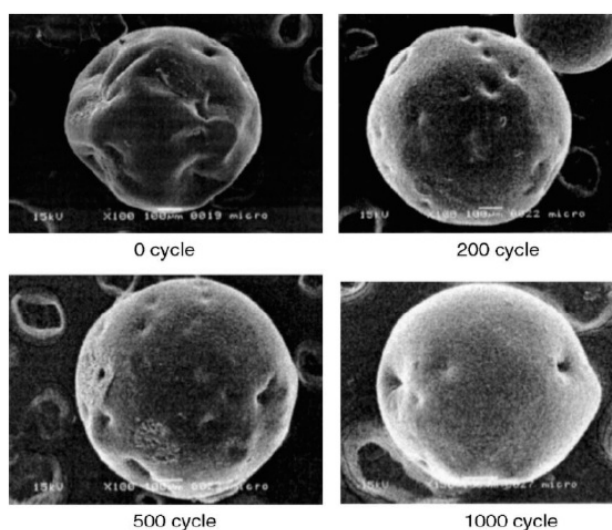
ภาพที่ 13 การเปรียบเทียบสมรรถภาพของระบบให้ความร้อนใต้พื้นห้องโดยใช้และไม่ใช้ PCM
ที่มา: Farid and Kong (2001)

5.4 วิธีการฝังหรือผสม PCM ในระดับไมโคร (Micro-encapsulation methods)

ค่าใช้จ่ายในการบรรจุ PCM และปัญหาต่างๆที่ตามมา คือปัญหาหลักสำหรับการพัฒนาระบบ PCM ในอดีต Hawes and Feldman (1990) ได้พิจารณาวิธีการผสม PCM โดยการผสมโดยตรง (direct incorporation) การจุ่มแช่ (immersion) และการฝังในแคปซูล (encapsulation) ในวิธีที่สามารถนิยามการปนเปื้อนของ PCM ภายในแคปซูล ที่มีการเปลี่ยนแปลงวัสดุ รูปแบบและขนาด ในลำดับของการผสม ดังนั้นจึงควรจะแนะนำถึงวิธีการผสมที่สะดวก โดยจะมีสองหลักการสำหรับตัวกลางในการผสม หลักการแรกคือ microencapsulation โดยการใช้ทรงกลมขนาดเล็กหรืออนุภาคที่มีรูปร่างเป็นหลอดปลายปิดบางๆ มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และอนุภาคนี้จะถูกเคลือบด้วยฟิล์มพอลิเมอร์ (polymeric film) จากนั้นจะรวมตัวกันอย่างเหมาะสมด้วย encapsulating film นั้นหมายความว่าฟิล์มต้องเหมาะสมสำหรับ PCM และช่องว่าง วิธีที่สองของ microencapsulation คือการบรรจุ PCM ลงไปในตัวบรรจุ เช่น ท่อ กระเป๋ รูปทรงกลม พานเกล หรือที่รองรับอื่นๆ ตัวบรรจุเหล่านี้จะถูกใช้งานโดยตรงเหมือนกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หรือรวมเข้าไปอยู่ในอุปกรณ์ก่อสร้าง PCM จำเป็นต้องถูกใส่ในแคปซูลเพื่อ PCM จะได้ไม่กระทบหรือทำปฏิกิริยากับวัสดุก่อสร้าง ในการทดลองก่อนหน้านี้เกี่ยวกับการบรรจุในขนาดไมโครหรือ macroencapsulation ล้มเหลวเนื่องจากความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ต่ำของ PCM เมื่อมันได้รับความร้อนและเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว PCM จะกลับเป็นของแข็งในตำแหน่งที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน แต่ด้วย

เทคโนโลยีของ microencapsulation ทำให้ขนาดของอนุภาคเล็กมาก จนไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ microencapsulation คือการยอมให้ PCM รวมตัวกันอย่างง่าย ๆ เข้าไปในโครงสร้างของวัสดุ ทั้งสองวิธีการในการผสม PCM ในคอนกรีตอาจจะมีข้อเสียบางอย่างคือ พลาสติกหรือโลหะที่ใช้เป็นแคปซูลสำหรับฝัง PCM มีราคาแพง แต่ปลอดภัยเหมือนกับ PCM ไม่สัมผัสกับคอนกรีตโดยตรง วิธีการจุ่มแช่ PCM ในคอนกรีตโดยตรงแบบดั้งเดิมนั้นได้ผลดี แต่ก็มีผลทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างของคอนกรีตลดลง

Hawlder *et al.* (2000) ได้ทำการทดลองและจำลองคุณลักษณะและสมรรถนะของการหุบจี๊ฟี่พาราฟินใน crosslink agent (HCHO) ในเทอมของสัดส่วนและความสามารถในการสะสมพลังงาน ซึ่งพบว่าการเคลือบจี๊ฟี่พาราฟินในอัตราส่วนที่สูงจะส่งผลให้มี encapsulation ratio ของจี๊ฟี่พาราฟินที่สูงขึ้น และทำให้เกิด hydrophilicity น้อยลง การทดสอบรอบของการให้ความร้อนแสดงให้เห็นว่าจี๊ฟี่พาราฟินที่ผสมเข้าไปจะยังคงรักษาลักษณะทางกายภาพและความสามารถในการสะสมพลังงาน หลังจาก 1,000 รอบของการใช้งานดังแสดงในภาพที่ 14 และเมื่อเร็ว ๆ นี้ Hawlder *et al.* (2002) ได้สร้างและเปรียบเทียบการผสมจี๊ฟี่พาราฟิน โดยวิธี complex coacervation and spray drying methods ซึ่งจะได้ microcapsules ที่สามารถเก็บสะสมและปลดปล่อยพลังงานได้สูง (145-240 กิโลจูลต่อกิโลกรัม) ขึ้นอยู่กับแกนที่ถูกเคลือบด้วยอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 7



ภาพที่ 14 ลักษณะของ microencapsulation ของพาราฟิน ที่พัฒนาโดย SEM ในรอบของการให้ความร้อนต่างๆกัน

ที่มา: Hawlder *et al.* (2002)

ตารางที่ 7 ปริมาณพลังงานที่ถูกปล่อยและสะสมของ PCM ด้วยวิธีการผลิตแบบ coacervated และ spray dried microencapsulated PCM

sample	Coacervated samples			Spray dried samples		
Ratio (core:coat)	(2:1)	(1:1)	(1:2)	(2:1)	(1:1)	(1:2)
Energy store (kJ/kg)	239.78	213.46	193.35	216.44	210.78	145.28
Energy release (kJ/kg)	234.05	224.31	196.38	221.51	211.66	148.32

ที่มา: Hawlader *et al.* (2002)

5.5 การหน่วงเวลาการติดไฟของโครงสร้างที่ผสม PCM

เมื่อสองสามปีที่ผ่านมามีข้อกังขาทางด้านความปลอดภัย ทำให้เกิดความต้องการวัสดุที่สามารถป้องกันโครงสร้างของอาคารจากการเกิดอัคคีภัย โดยได้มีการค้นคว้าและประสบความสำเร็จในห้องทดลอง โดยได้มีการทดสอบการหน่วงเวลาการติดไฟของ PCM ใน พลาสติกเทอร์บอร์คโดย Salyer and Sircar

ก. การเพิ่มพื้นผิวทนความร้อนลงบนพลาสติกเทอร์บอร์ค (เช่น Aluminum foil, rigid polyvinyl chloride film)

ข. การปรับสภาพอย่างต่อเนื่องของพลาสติกเทอร์บอร์คเริ่มจากใน PCM จากนั้นจะมีการปรับสภาพของเหลวทนความร้อนที่ไม่แตกตัว (เช่น Fyrol CEF) ของเหลวทนความร้อนที่ไม่แตกตัวจะไปแทนที่ PCM บางส่วน บางครั้งจะถูกฉาบไว้บนพื้นผิว

ค. การใช้สาร brominated hexadecane และ octadecane เป็น PCMs ซึ่งจะลดการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนของพลาสติกเทอร์บอร์ค

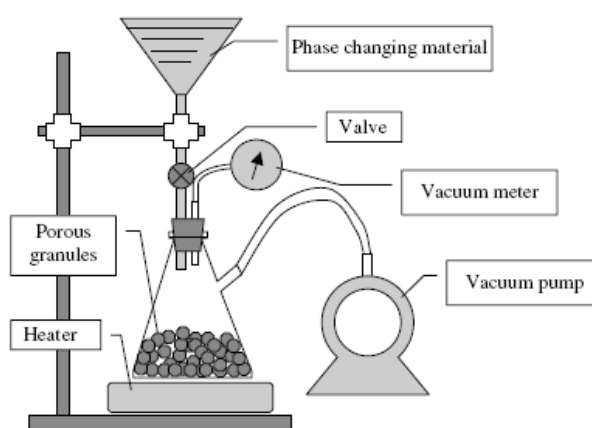
ง. การเคลือบผิวทนความร้อนอาจจะถูกใช้เพื่อป้องกันผลที่เกิดจาก wicking action ของกระดาศที่เคลือบพลาสติกเทอร์บอร์ค

Banu *et al.* (2000) ได้ทดสอบความสามารถในการติดไฟของวอลบอร์คที่ผสมพลังงานในผนังยิปซัมวอลบอร์คที่มีส่วนผสมของ PCM ประมาณ 24% การทดสอบความสามารถในการติดไฟเพื่อหาคุณลักษณะของการติดไฟของพื้นผิว อัตราการไหม้และควันที่เกิดขึ้น สามารถแยกแยะได้จาก steiner tunnel และความร้อนและควันที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จาก cone calorimeter การเปรียบเทียบของผลการทดสอบได้ผลเช่นเดียวกับวัสดุก่อสร้างอื่นๆ แสดงว่าอาจจะเป็นไปได้ที่จะลดความสามารถในการติดไฟของวอลบอร์คที่เก็บสะสมพลังงานด้วยการผสมสารทนความร้อน

6. PCM ในรูปพูนกราไฟต์หรือโลหะ

เหตุผลประการหนึ่งที่สำคัญว่าทำไม PCM มักจะบรรจุเป็นแคปซูลเสมอ ก็เพื่อมีการปรับปรุงค่าความนำความร้อน จี๊ฟิงพาราฟินเป็นอีกตัวอย่างหนึ่งที่มีค่าความนำความร้อนต่ำเพียง 0.24 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (Chromalox, 2002) โดยเพื่อประสิทธิภาพของ PCM ในการดูดความร้อนและคายความร้อนได้อย่างรวดเร็ว จึงควรมีค่าความนำความร้อนสูง และหนึ่งในวิธีผลิตก็คือการดูดซับให้อยู่ในรูปพูนของกราไฟต์

วัสดุที่มีค่าความนำความร้อนสูง โดยมีค่าประมาณ 150 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (Chromalox, 2002) คือแร่กราไฟต์ Py, Olives and Mauran (2001) อธิบายถึงการทำงานของกราไฟต์ที่มีลักษณะเป็นรูปพูน บรรจุด้วยจี๊ฟิงพาราฟิน เช่นเดียวกับ PCM แร่กราไฟต์จะอยู่ในรูปของกราไฟต์ขยายขนาดรูปพูน (expanded graphite) ซึ่งวิธีการขยายรูปพูนสามารถทำได้โดยนำผงกราไฟต์ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลาสองชั่วโมง จากนั้นทำการอัดเข้าด้วยกัน ในรูปของเม็ด (granular) ซึ่งค่าความหนาแน่นในการอัดสามารถแปรเปลี่ยนได้ โดยหากค่าความหนาแน่นต่ำจะหมายถึงมีรูปพูนเยอะ และจี๊ฟิงพาราฟินสามารถถูกดูดซับเข้าไปในรูปพูนในปริมาณมาก แต่ค่าความแข็งแรง (mechanical strength) ลดลงอย่างมาก และหากค่าความหนาแน่นสูงจะมีค่าความแข็งแรงดี แต่สามารถดูดซับปริมาณจี๊ฟิงพาราฟินได้น้อย โดยการดูดซับของรูปพูนกราไฟต์นั้นทำได้โดยจุ่มผง กราไฟต์ลงในจี๊ฟิงพาราฟินหลอมเหลวดังภาพที่ 15 โดยปริมาณการดูดซับขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ของกราไฟต์ อุณหภูมิในการจุ่ม เวลา และขนาดของรูปพูนกราไฟต์ แต่ก็ควรให้มีปริมาณจี๊ฟิงพาราฟินในรูปพูนไม่ต่ำกว่า 95%



ภาพที่ 15 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการผลิต paraffin/graphite expanded PCM
ที่มา: Dong *et al.* (2005)

paraffin/graphite expanded PCM มีความสามารถในการกักเก็บพลังงานความร้อนสูง และยังมีค่าความนำความร้อนที่ดีอีกด้วย โดยค่าความนำความร้อนขึ้นอยู่กับความเป็นรูพรุนของกราฟไฟต์ และยังมีความเป็นไปได้ที่จะนำ PCM ดูดซับในรูพรุนของโลหะ เนื่องจากโลหะมีค่าความนำความร้อนที่สูงมาก และผลิตภัณฑ์ที่ได้ (paraffin/metal PCM) จะมีความเสถียรมาก แต่เนื่องจากเหล็กมีความหนาแน่นที่มากเกินไป ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงจะมีน้ำหนักมากเกินไปจนเกิดความต้องการ

Zhengguo *et al.* (2005) ได้ทำการผลิต Paraffin/Expanded Graphite Composite PCM โดยการนำกราฟไฟต์ไปทำการขยายขนาดของรูพรุน แล้วจึงนำไปแช่ในจีฟี่งพาราฟินหลอมเหลวเพื่อให้กราฟไฟต์ดูดซับจีฟี่งพาราฟินเข้ารูพรุน โดยได้ทำการทดลองเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการเก็บสะสมและคายพลังงานความร้อน โดยการนำจีฟี่งพาราฟินกับ composite PCM มาใส่ใน Tube แยกกัน จากนั้นนำ tube ทั้งสองแช่ลงใน water bath ที่มีอุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 140 วินาที เพื่อปรับอุณหภูมิของทั้ง 2 tubes ให้เท่ากัน จากนั้นให้ย้าย Tube ทั้งสองไปแช่ใน water bath ที่มีอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส พบว่าจีฟี่งพาราฟินใช้ถึงเวลา 1,040 วินาที จึงจะเปลี่ยนอุณหภูมิจาก 29 องศาเซลเซียสไปเป็น 65 องศาเซลเซียส ส่วน composite PCM ใช้เวลาเพียง 760 วินาที จากนั้นจึงนำ Tube ทั้งสองย้ายไปแช่ใน water bath ที่มีอุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียสอีกครั้ง เพื่อคายความร้อนพบว่า จีฟี่งพาราฟินใช้เวลาในการคายความร้อนจากอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสไปเป็น 29 องศาเซลเซียสถึง 500 วินาที ส่วน composite PCM ใช้เวลาเพียง 240 วินาที จะเห็นว่า composite PCM สามารถลดเวลาในการเก็บสะสมพลังงานความร้อนได้ถึง 27.4 % และสามารถลดเวลาในการคายความร้อนได้ถึง 56.4 %

Dong *et al.* (2004) ได้ทำการทดลองดูดซับ PCM ในวัสดุรูปพรุนที่แตกต่างกัน ได้แก่ ถ้ำลอย (fly ash) ดินเหนียว (clay) และเพอร์ไลต์ (perlite) และใช้ PCM ต่างชนิดกันไป แต่เน้นที่ขี้ผึ้งพาราฟิน โดยทำการดูดซับด้วยวิธี vacuum impregnation ลักษณะของอุปกรณ์แสดงดังภาพที่ 15

วัสดุที่มีรูปพรุนจะถูกใส่ลงไปในขวดแก้วที่เชื่อมต่อกับปั๊มสุญญากาศ เครื่องมือวัดสุญญากาศและที่ใส่ของเหลว PCM การเชื่อมต่อระบบจะผนึกเข้าด้วยกันโดยมีน้ำมันขี้ผึ้ง (vacuum grease) ผนึกไว้ ปั๊มสุญญากาศจะนำมาใช้ในการถ่ายเทอากาศจากวัสดุรูปพรุน และเครื่องวัดสุญญากาศจะใช้ในการตรวจความดันสุญญากาศภายในระบบ กระบวนการในการดูดอากาศออกจะใช้เวลาประมาณ 30 นาที ที่ความดันสุญญากาศ 88.1 กิโลปาสกาล จากนั้นวาล์วระหว่างขวดแก้วและแก้วที่บรรจุของเหลว PCM จะเปิดให้ของเหลว PCM ไหลเข้าสู่ขวดแก้วและปกคลุมวัสดุรูปพรุนซึ่งอยู่ในรูปของ granular และในขั้นตอนสุดท้ายเครื่องสูบลมสุญญากาศจะถูกปิด อากาศจะเข้ามาในขวดแก้วและดันให้ของเหลว PCM เข้าสู่รูปพรุนของวัสดุที่มีรูปพรุน หลังจากการกำหนดเวลาในการแช่ PCM ในวัสดุรูปพรุนจะถูกนำออกมาจากขวดแก้วและทำความสะอาดด้วยผ้าแห้ง ในบางกรณีผลิตภัณฑ์จะได้รับการทำความร้อนที่อุณหภูมิที่เหมาะสม

หลังจากกระบวนการ vacuum impregnation ผลิตภัณฑ์ที่ได้ จะนำมาเก็บรักษาด้วยการเคลือบวัสดุ ในกระบวนการเคลือบ วัสดุรูปพรุนที่มี PCM อยู่ภายใน จะถูกนำมาแช่ในวัสดุที่ใช้เคลือบประมาณ 5 นาที โดยวัสดุที่ใช้เคลือบแบ่งเป็น PMC (Polymer Modified Cement paste) 3 ชนิด ซึ่งแตกต่างกันในปริมาณของซีเมนต์ ลาเท็กซ์ น้ำและพอลิเมอร์ และวัสดุที่ใช้เคลือบอีกชนิดคือ normal cement หลังจากผ่านขั้นตอนการเคลือบจะนำออกมาวางบนตะแกรงสแตนเลส แล้วทำการแช่เพื่อแยกผลิตภัณฑ์ที่มีการเคลือบอย่างสมบูรณ์ออกมา สำหรับซีเมนต์จะใช้เวลา 28 วันในการบ่ม

และจากการทดลองต่างๆสามารถสรุปผลได้ดังนี้

ก. PCMที่เป็นสารอินทรีย์ (กรดไขมัน วัสดุที่ได้จากกรดไขมัน และขี้ผึ้งพาราฟิน) และอินทรีย์ที่มีรูปพรุน (ดินเหนียว ถ้ำลอย และเพอร์ไลต์) เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการผลิต granular phase change materials ซึ่งมีความเหมือนกันทางเคมี มีความสามารถในการกักเก็บพลังงานได้มาก ไม่มีพิษและราคาถูก

ข. วิธีการ vacuum impregnation มีผลในการดูดซับวัสดุที่มีรูปพรุนด้วย PCM ที่เป็นสารอินทรีย์ โดยมากกว่า 65% ของปริมาตรสามารถดูดซับ PCM ในวัสดุที่มีรูปพรุนได้ด้วยวิธีการนี้ ซึ่งสามารถติดตั้งง่ายและราคาถูก การตั้งค่าพารามิเตอร์ของวิธีการ vacuum impregnation คือเวลาในการแช่และอุณหภูมิ ที่สมเหตุสมผล

ค. ค่าความหนาแน่นในการกักเก็บพลังงานหรือค่าความร้อนแฝงของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วน (fraction) ของ PCM ในสารประกอบ และเมื่อปริมาณของ PCM เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์จะทำให้ช่วงการเปลี่ยนสถานะกว้างขึ้น ซึ่งกล่าวได้ว่าคุณสมบัติทางฟิสิกส์และลักษณะของรูปทรงมีผลต่อคุณลักษณะในการเปลี่ยนสถานะของผลิตภัณฑ์

ง. ไม่มีการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของ PCM หลังจาก การเก็บเป็นระยะเวลา 1 ปีขึ้นไป ในวัสดุที่มีรูปทรงซึ่งจะสามารถพบได้จากวิธีการ FTIR

จ. ลาเท็กซ์ที่มีความเข้มข้นมากจะเป็นวัสดุในการเคลือบที่ดี ซึ่งจากการวิจัยพบว่าคุณสมบัติในการปิดผนึกมากกว่า 40 เท่าของซีเมนต์และมากกว่า 7 เท่าของพอลิเมอร์ที่ดีที่สุด

7. PCMs ในพอลิเมอร์

การวิจัยเกี่ยวกับการ encapsulation ของ PCM ในพอลิเมอร์เสร็จสิ้นเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมา ซึ่งเป็นสัญญาณที่ดีมากที่มีความเป็นไปได้ที่จะ encapsulation ให้กับ PCM ทุกชนิดได้ โดยเฉพาะพวกซีฟิงพาราฟิน เนื่องจากพอลิเมอร์ไม่มีสนิมขึ้น ซึ่งง่ายที่จะผลิตและยังมีราคาถูก พร้อมทั้งยังมีความหนาแน่นต่ำอีกด้วย จึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจที่จะนำมา encapsulation โดยความหนาแน่นของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส อยู่ในช่วง 910 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Polypropylene) และ 2,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Polytetrafluoroethylene) อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์ส่วนมากจะมีความหนาแน่นใกล้เคียงที่ 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Neubronner, 1997)

นอกจากนี้สารประกอบของพอลิเมอร์และ PCM มีความหนาแน่นต่ำและมีค่าความจุความร้อนสูง จึงสามารถถูกใช้ในวัสดุก่อสร้างในรูปของ Panel เช่น ผนังที่อยู่ภายในกำแพงคอนกรีต (Salyer, 1998) หรือเป็นฉนวนเป็นส่วนหนึ่งของคอนกรีต แต่ก็ยังคงมีอุปกรณ์ชนิดอื่นเป็นที่ยอมรับประกอบ มันยังสามารถถูกใช้ในเนื้อผ้าซึ่งอยู่ในรูปของเส้นใย (Salyer, 1999) หรือขึ้นรูปเป็นภาชนะของอาหารและเครื่องดื่ม (Salyer, 1991 & 1996) และมันยังถูกผสมอยู่ในของเหลวที่ส่งผ่านความร้อนซึ่งอยู่ในรูปของ pellets (Hawe, 1984) หรือมันสามารถเก็บในในรูปของภาชนะบรรจุเพื่อที่จะนำของเหลวให้ส่งผ่านความร้อนผ่านมันไปได้

เป็นไปได้ที่จะใช้สารประกอบ polymer-PCM เป็นตัวเก็บความร้อนในรถยนต์ เช่น เพื่อที่จะทำให้เกิดความร้อนกับกระบวนการทางเคมีสำหรับการติดเครื่องรถยนต์ที่ใช้เมทานอลเป็นเชื้อเพลิง ซึ่ง polymer-PCM-compound ต้องมีความจุขนาดใหญ่ น้ำหนักเบาและแน่นอนเช่นเดียวกับที่รถยนต์ที่ใช้ ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง

มีความเป็นไปได้หลายทางที่จะ encapsulate PCM ในพอลิเมอร์ ซึ่งงานที่เกี่ยวกับด้านนี้ได้สำเร็จไปเมื่อปี 1970 Best (1977) ทำการผสม PCM กับพอลิเมอร์ ก่อนที่พอลิเมอร์จะเกิดการ crosslinked ดังนั้นมันจึงจำเป็นที่ PCM จะสร้างการกระจายตัวที่เสถียร ก่อนที่พอลิเมอร์จะเกิดการ crosslinked เพื่อป้องกันรั่วไหลของ PCM

Hawe (1984) ได้มีความก้าวหน้าในหลายปีถัดมา โดยศึกษาทำการผสมวัสดุ polymerisable กับ inorganic hydrate ซึ่งเป็นวัสดุเก็บสะสมความร้อน วัสดุ polymerisable เป็นหนึ่งในมอนอเมอร์ ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับน้ำจากสารประกอบจำพวกน้ำ เมื่อสถานะมีน้ำในระดับต่ำพอลิเมอร์ จะทำการ crosslinked โดยใช้ crosslinking agent ดังนั้นการผสมของวัสดุเก็บความร้อนและวัสดุ polymerisable ควรจะอยู่ในรูปของสารละลายที่สามารถละลายได้ เช่น ในน้ำ แต่อย่างไรก็ตาม สารประกอบลัฟท์ที่ได้จะต้องอยู่ในบรรยากาศเฉื่อย ดังนั้นมันจึงไม่สามารถผสมกับน้ำได้ ซึ่งในกระบวนการนี้มี 25% ของน้ำหนักของวัสดุเก็บความร้อนใน polymeric matrix

วิธีการอีกอย่างหนึ่ง ของการนำ PCM และพอลิเมอร์มาผสมกัน คือทำโดยการขึ้นรูปพอลิเมอร์ matrix ที่ crosslinked และสามารถดูดซับ PCM ที่หลอมเหลวเหมือนกับขี้ผึ้งพาราฟิน ดังนั้น polyethylene ที่มีความหนาแน่นสูงอาจเกิดการ crosslinked ถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะคงที่ อย่างไรก็ตามก็สามารถที่จะดูดซับได้มากถึง 80% โดยน้ำหนักของ PCM (Salzer, 1987 & 1991) วิธีการ crosslinked สามารถใช้ electron beam การแผ่รังสีแกมมาหรือปฏิกิริยาเคมี หลังจากมีการ crosslinked พอลิเมอร์ถูกจุ่มลงในวัสดุหลอมเหลวที่เกิดการเปลี่ยนเฟส เพื่อที่จะทำให้ชุ่มด้วยพอลิเมอร์ ส่วนประกอบทั้งหมดจะมีความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะ 170 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ถ้า PCM มีค่าความร้อนจากการเปลี่ยนเฟส 210 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ทำให้เกิด 80% โดยน้ำหนักของส่วนประกอบ และต่อมา Salzer (1991) ทำการเติมหน่วยการเกิดไฟเพื่อที่จะสร้างส่วนประกอบฉนวนกันไฟ

ปัญหาของวิธีการได้อธิบายไว้ข้างต้นแล้ว ซึ่งปัญหานั้นเกิดจากการ crosslinked ซึ่งมีราคาแพง ใช้พลังงานสูง และใช้เวลามากโดยทั่วไปหลายชั่วโมง เพื่อที่จะแก้ปัญหานี้ นักวิจัยหลายคนพยายามที่จะผสม PCM กับพอลิเมอร์โดยไม่ให้เกิดการ crosslinked ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือผสมกับ Polyolefin ดังเช่น polyethylene และขี้ผึ้งพาราฟิน นักค้นคว้าทำการหลอมขี้ผึ้งพาราฟินกับพลาสติกผสมเข้าด้วยกันและปล่อยให้เย็น ถ้าสารประกอบมีพอลิเมอร์มากพอขี้ผึ้งพาราฟินและ Polyethylene จะสร้างการกระจายตัวเป็นของแข็ง ซึ่งยังคงเป็นของแข็งที่จุดสูงกว่าจุดหลอมเหลว

ของซีฟี่พาราฟินและอยู่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ ซึ่งพลาสติกและ PCM จะไม่สร้างพันธะทางเคมีต่อกัน

การผสมแบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ตามที่อธิบายไว้แล้วในหมวดนี้ เช่นคุณสมบัติการอ่อนตัวลงเมื่อถูกความร้อน คือมันสามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการหลอมและขึ้นรูปใหม่อีกครั้ง ไม่มีพิษ และไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานจำนวนมากที่จะผลิตและวัสดุนี้เองก็มีราคาถูกและสามารถหาได้ง่ายเป็นที่แพร่หลาย

ปัญหาหลายอย่างที่เกิดจากพอลิเมอร์และซีฟี่พาราฟินผสมกันถูกรายงานไว้ว่าการรั่วซึมของซีฟี่พาราฟินบางชนิดที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวก็เป็นปัญหาที่ใหญ่ที่สุดปัญหาหนึ่ง Salyer (1999) ได้แก้ปัญหานี้โดยการเติมโคพอลิเมอร์และอนุภาค silica ลงไปใน polyethylene-paraffin-compound

อีกปัญหาหนึ่งก็คือ ปัญหาของการนำความร้อนต่ำของสารประกอบซึ่ง polyethylene มีค่าการนำความร้อนน้อยมากเท่ากับ 0.35 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (Neubronner, 1997) และค่าการนำความร้อนของซีฟี่พาราฟินแยยิ่งกว่าเท่ากับ 0.24 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (Chromalox, 2002) จึงทำให้ของผสมมีค่าการนำความร้อนต่ำ คุณสมบัตินี้เป็นที่ต้องการในการประยุกต์ใช้บางชนิด เช่นในภาชนะเครื่องดื่ม แต่ในการประยุกต์ใช้อื่น ๆ ต้องการค่าการนำความร้อนสูง ๆ ดังนั้นนักค้นคว้าพยายามที่จะปรับปรุงให้ค่าการนำความร้อนของ polymer-paraffin-compound ดีขึ้นโดยการผสมผงกราฟไฟต์ลงไปในสารประกอบ 3% (Xiao, Feng and Gong, 2001)

Inaba and Tu (1997) ศึกษาการแสดงที่เกี่ยวกับความร้อนของ shape stabilized phase change material (PCM) ของ ซีฟี่พาราฟินและ HDPE วัสดุประกอบด้วยซีฟี่พาราฟิน 74 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิการหลอมละลาย 54 องศาเซลเซียส และความร้อนของการหลอมละลาย 121.4 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

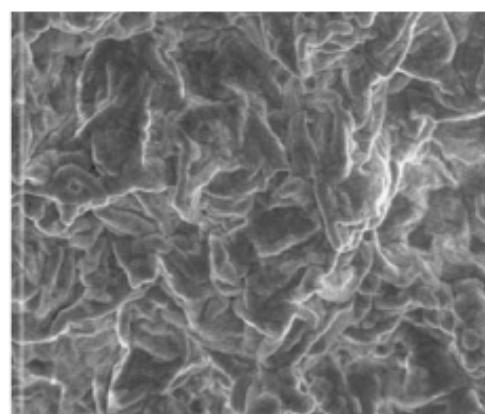
Ye and Ge (2000) ตรวจสอบหาความจริงหลากหลายที่โพลิเอทิลีน (HDPE) ความหนาแน่นสูง ด้วยความแตกต่างของการหลอมละลาย (MI) สำหรับใช้ขับเคลื่อน วัสดุและสกรีนที่เหมาะสมที่สุด

Xavier *et al.* (2001) เตรียม paraffin/graphite shape stabilized PCM ด้วยการนำความร้อนสูง อุณหภูมิการหลอมละลายของขี้ผึ้งพาราฟินเป็น 70–80 °C และ -9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

Xiao *et al.* (2002) เลือกสไตรีน-บิวทาไดเ็น-สไตรีนโคพอลิเมอร์ (SBS) เป็นวัสดุสนับสนุน (supporting material) ในการผลิต shape stabilized PCM วัตถุดิบนี้ประกอบด้วยขี้ผึ้งพาราฟินสูงถึง 80% โดยน้ำหนัก จุดหลอมเหลวและความร้อนแฝงของการหลอมละลายเป็น 56–58 องศาเซลเซียส และ 165.21 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เพื่อคุณสมบัติในการนำพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้น บางตัวอย่างสามารถเพิ่มผงกราฟไฟท์เข้าไปในผลิตภัณฑ์ เมื่อพิจารณาขี้ผึ้งพาราฟินที่สร้างเฟสกระจายตัวในโครงสร้างพอลิเมอร์ SBS อาจจะเป็นวัสดุสนับสนุนที่ดีที่สุด โดยรูปผลิตภัณฑ์แสดงดังภาพที่ 16 อย่างไรก็ตาม มีข้อบกพร่องตายตัวกล่าวคือถ้าผลิตผลทำจาก SBS-ขี้ผึ้งพาราฟินมีขนาดใหญ่ขึ้น ผลิตภัณฑ์จะรับน้ำหนักได้น้อยและจะทำให้เสียรูปอย่างเห็นชัด shape stabilized PCM สามารถทำให้หมดกำลังจุดอ่อนดังที่กล่าวมาก่อนแล้วของ PCM ดังนั้นจึงไม่เหมาะกับการนำมาใช้ร่วมกับสิ่งก่อสร้าง และค่าคุณสมบัติทางความร้อนของ shape stabilized ที่ประกอบด้วยสารผสมชนิดต่างๆกัน แสดงดังตารางที่ 8 ซึ่งเป็นการรายงานผลแสดงเห็นชัดว่า shape stabilized PCM ในสิ่งปลูกสร้างหรือใช้เป็นอุปกรณ์ต่างๆ เป็นเทคนิคและควรจะได้รับการศึกษามากขึ้น



(a)



(b)

ภาพที่ 16 (a) shape stabilized PCM ในลักษณะ plate

(b) ภาพถ่าย SEM ของ shape stabilized PCM โดยเครื่อง HITACHI S-450

ที่มา: Xiao *et al.* (2002)

ตารางที่ 8 คุณสมบัติทางความร้อนของ shape stabilized PCM

Sample	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)
Paraffin	20.3	119.66
Paraffin/SBS/wollastonite = 70/25/5	20.0	86.66
Paraffin/SBS/clay-1 = 70/25/5	20.4	88.86
Paraffin/SBS/clay-2 = 70/25/5	21.0	90.37
Paraffin/SBS/clay-3 = 70/25/5	20.3	96.82
Paraffin/SBS/Mg(OH) ₂ = 70/10/20	20.6	82.97
Paraffin/SBS/Mg(OH) ₂ = 70/10/10	20.7	82.17
Paraffin/SBS = 70/30	20.5	87.43
Paraffin/HDPE/diatomite = 70/15/15	20.7	81.21
Paraffin/HDPE/diatomite = 70/10/20	20.1	90.96
Paraffin/HDPE/diatomite = 70/20/10	20.3	87.45
Paraffin/HDPE0 = 70/30	20.6	87.43
Paraffin/SBS = 70/30 (surface grafting)	20.7	62.76
Paraffin/HDPE = 75/25	60.0-62.0	130.8
Paraffin/HDPE = 80/20	60.0-62.0	137.9

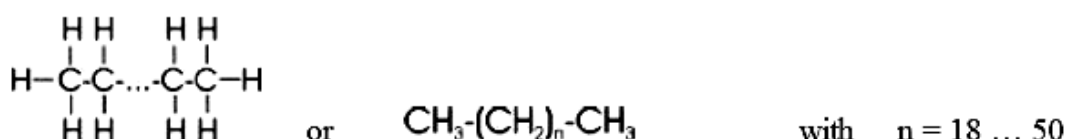
ที่มา: Xiao *et al.* (2002)

โครงสร้างทางเคมีของซีฟี่งพาราฟินและ LDPE มีความเหมือนกันทั้งสองอย่างมีสายโซ่ของคาร์บอนและไฮโดรเจนอะตอมที่ยาว ซึ่งสูตรทางเคมีคือ C_nH_{2n+2} ความแตกต่างกันคือจำนวนของอะตอม

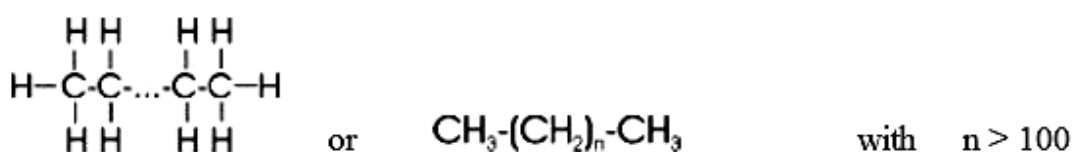
ซีฟี่งพาราฟินที่มีจุดหลอมเหลวระหว่าง 30 องศาเซลเซียส และ 90 องศาเซลเซียส มีสายโซ่ที่มีจำนวนของคาร์บอนอะตอมอยู่ในช่วงระหว่าง 18 และ 50 (Rubitherm, 2002) ขณะที่ polyethylene มีจำนวนคาร์บอนอะตอมมากกว่า 100 ยิ่งสายโซ่ซีฟี่งพาราฟินยาวเท่าไรอุณหภูมิหลอมเหลวก็สูงขึ้นเท่านั้น (Rubitherm, 2002)

โคพอลิเมอร์ EVA ก็มีสายโซ่ C และ H ยาว แต่ในสภาวะที่ไม่มีระเบียบ จะมีโมเลกุลบางตัวไปอยู่ในที่ของไฮโดรเจนอะตอม ซึ่งโมเลกุลนี้เรียกว่า vinyl-acetate ซึ่งมีเพียงแรงระหว่างโมเลกุล แต่ไม่มีพันธะระหว่างสายโซ่ของ LDPE และ EVA โครงสร้างของวัสดุที่อธิบายไว้ด้านบนมีดังภาพที่ 17

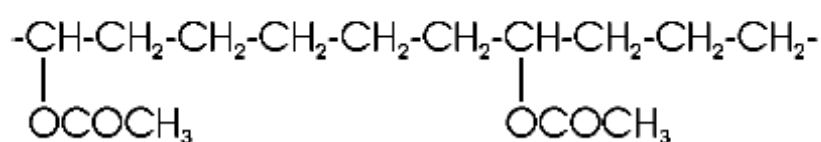
Paraffin waxes:



Polyethylene:



Ethylene-vinyl acetate:



ภาพที่ 17 โครงสร้างโมเลกุลของ paraffin wax, polyethylene และ ethylene-vinyl acetate

เนื่องจากความเหมือนกันในโมเลกุลของจีฟี่งพาราฟิน LDPE และ EVA วัสดุเหล่านี้สามารถละลายและผสมกันอย่างง่ายดาย ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนที่ใช้ในการผสมของจีฟี่งพาราฟินและพอลิเมอร์ ซึ่งจีฟี่งพาราฟินจะสร้างเฟสการกระจายตัว (dispersed phase) ในโครงสร้าง (matrix) ของพอลิเมอร์ หรือพอลิเมอร์จะสร้างเฟสการกระจายตัวในโครงสร้างของจีฟี่งพาราฟิน เพื่อที่จะ

ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่ดี จี๊ฟี่พาราฟินควรจะสร้างเฟสของการกระจายตัว สาเหตุที่ใช้โคพอลิเมอร์ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากกลุ่มของ vinyl-acetate จะทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ยาวและทำให้สร้างโครง สร้างที่เหมาะสมกับจี๊ฟี่พาราฟินที่มีสายโซ่สั้น จี๊ฟี่พาราฟินมีช่วงอุณหภูมิหลอมละลายกว้าง ดังนั้น อุณหภูมิที่เป็นพีค (peak) สูงสุดจากกราฟที่ได้จากเครื่อง DSC จึงกำหนดให้เป็นอุณหภูมิหลอมละลาย แทนอุณหภูมิหลอมเหลวที่ได้จาก onset temperature ของพีคการหลอมละลาย ซึ่งนำไปใช้กับวัสดุอื่นๆ ด้วย

จากเอกสารและการค้นคว้าสามารถสรุปได้ว่าสารประกอบ polyethylene และจี๊ฟี่พาราฟินแสดงให้เห็นว่ามีคุณสมบัติเก็บความร้อนดีมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผลิตภัณฑ์ shape stabilized PCM ที่ประกอบด้วยจี๊ฟี่พาราฟิน (paraffin wax) กับ HDPE และจี๊ฟี่พาราฟินกับ LDPE EVA และผงกราฟท์ได้ถูกผลิตขึ้น ค่าคุณสมบัติทางความร้อนต่างๆ เช่น ค่าความร้อนแฝง ค่าความจุความร้อน ค่าความนำความร้อน ความคงทนต่อรอบการใช้งาน ค่าความร้อนแฝงภายหลัง 20 รอบการใช้งาน heating และ cooling curve รวมไปถึงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ และการทดลองเปรียบเทียบการลดอุณหภูมิของน้ำที่บรรจุในแก้วทดสอบ โดยมีจี๊ฟี่พาราฟินบรรจุในช่องว่างระหว่างแก้ว 2 ชั้น

8. Differential Scanning Calorimetry (DSC)

Differential Scanning Calorimetry หรือ DSC เป็นเทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน โดยใช้วิธีการพิจารณา heat flow ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงของสารที่ทดสอบ เครื่อง DSC เป็นเครื่องมือที่ใช้ช่วยในการตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อนทั้งในเชิงฟิสิกส์และเคมีของสารที่ไม่ทราบส่วนประกอบ หรือ สารที่ไม่ทราบลักษณะการเปลี่ยนสถานะ การทดสอบโดยใช้เครื่อง DSC จะสามารถให้ทั้งค่าเชิงปริมาณและคุณภาพ ทั้งในกระบวนการ endothermic (ดูดความร้อน) และ exothermic (คายความร้อน) โดยชุดเครื่องมือ DSC แสดงดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ชุดเครื่องมือ DSC

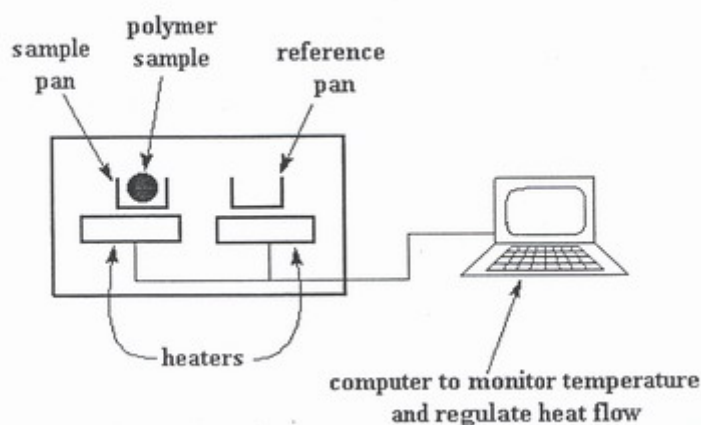
ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงความร้อนได้แก่ การหลอมเหลว recrystallization decomposition out-gassing หรือ การเปลี่ยนแปลงค่าความจุความร้อน เป็นต้น เครื่อง DSC สามารถวัดค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ตั้งแต่เริ่มต้นปฏิบัติการจนถึงจุดสิ้นสุดปฏิบัติการ รวมถึงค่าอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงที่สุดอีกด้วย เครื่อง DSC มีประโยชน์อย่างมากในการตรวจสอบสารตัวอย่างชนิดเดียวกัน โดยพิจารณาที่ความเหมือนและแตกต่างของสารเจือปนซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติทางความร้อนของสาร หลักการทำงานของเครื่อง DSC ในการทดสอบสารตัวอย่าง เราจะนำสารตัวอย่างบรรจุลงใน cup ขนาดเล็ก และจะนำ cup ที่บรรจุสารตัวอย่าง และ cup เปล่าซึ่งใช้เป็นตัวอ้างอิงไปวางลงบน DSC apparatus ตัวเครื่อง DSC จะให้ความร้อนหรือให้ความเย็นโดยมีการควบคุมอัตราและจะพิจารณาความแตกต่างของ heat flow ระหว่างสารตัวอย่างและตัวอ้างอิง ลักษณะของ heat flow ในระหว่างที่เครื่อง DSC ให้ความร้อนหรือให้ความเย็นจะขึ้นอยู่กับรูปแบบการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบดูดพลังงานหรือคายพลังงาน

เครื่อง DSC จะทำการวัดค่าพลังงานที่แตกต่างกันระหว่างสารตัวอย่างที่บรรจุใน cup และ cup เปล่า (ตัวอ้างอิง) ในการทำให้ทั้ง 2 cup มีอุณหภูมิเท่ากันทั้งในช่วงการทำให้สารร้อนและการทำให้สารเย็น ที่ได้ DSC apparatus (ที่วาง cup ทั้งสอง) จะมีอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิ (Pt resistance thermometers) และอุปกรณ์ทำความร้อน (resistance heater) ในการให้ความร้อนกับ cup ทั้งสองจะให้ความร้อนในอัตราจำเพาะขึ้นอยู่กับผู้ทดสอบจะกำหนดค่าที่เครื่องคอมพิวเตอร์ของ DSC โดยปกติจะใช้อัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

กรณีที่สารตัวอย่างไม่มีการเปลี่ยนสถานะขณะทำการทดสอบ ค่า heat flux ของสารตัวอย่างจะคงที่ แต่ในกรณีที่สารตัวอย่างมีการเปลี่ยนสถานะ อุณหภูมิของสารตัวอย่างและตัวอ้างอิงจะแตกต่างกัน ในช่วงนี้เครื่อง DSC จะมีการให้พลังงานกับสารตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสารตัวอย่างและตัวอ้างอิงจะลดต่ำลง โดยปกติค่าความแตกต่างของอุณหภูมิจะต้องมีค่าน้อยกว่า 0.01 เคลวิน โดยพลังงานที่ให้กับสารตัวอย่างต่อหน่วยเวลาจะถูกบันทึกไว้ในรูปของอุณหภูมิ

ในการทดสอบด้วยเครื่อง DSC หากมีการให้พลังงานเพิ่มกับสารตัวอย่างแสดงว่าเป็นกระบวนการดูดพลังงาน แต่หากในการทดสอบมีการให้พลังงานกับตัวอ้างอิง แสดงว่าเป็นกระบวนการคายพลังงาน โดยตามหลักการของ thermodynamics การเกิดการให้พลังงานจากสิ่งแวดล้อมเข้าไปในระบบ ค่าพลังงานจะเป็นบวก สำหรับในกรณีการทดสอบด้วยเครื่อง DSC นี้ ถ้าเครื่อง DSC มีการให้พลังงานกับสารตัวอย่าง เป็นกระบวนการดูดความร้อน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (ΔH) จะเป็นบวก

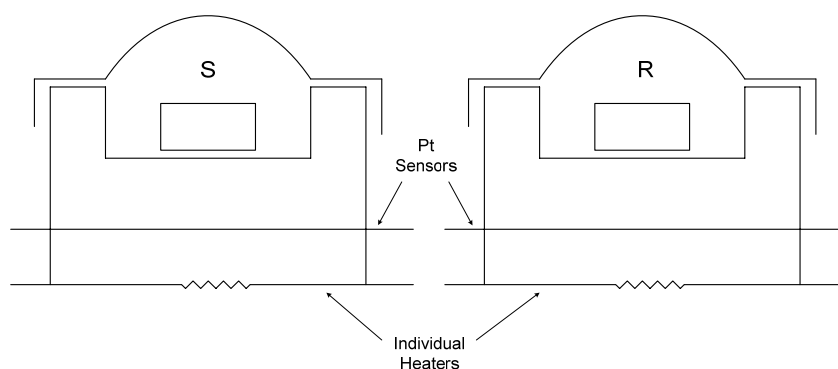
ช่วงอุณหภูมิที่เครื่อง DSC สามารถให้พลังงานชดเชยได้อยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 110 ถึง 1000 เคลวิน



ภาพที่ 19 ชุดอุปกรณ์สำคัญของเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)

ที่มา: Gaelle and Helenne (2001)

จากภาพที่ 19 เป็นรูปแสดงชุดอุปกรณ์สำคัญของเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) cup ที่บรรจุสารตัวอย่างและ cup เปล่าที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงจะถูกวางอยู่บน DSC apparatus ซึ่งจะมีตัว resistance sensor ใช้วัดอุณหภูมิของแต่ละ cup และตัว Resistance Heater อุปกรณ์ให้ความร้อนติดอยู่ ตำแหน่งการจัดเรียงอุปกรณ์ที่บรรจุ cup แสดงอยู่ในภาพที่ 20

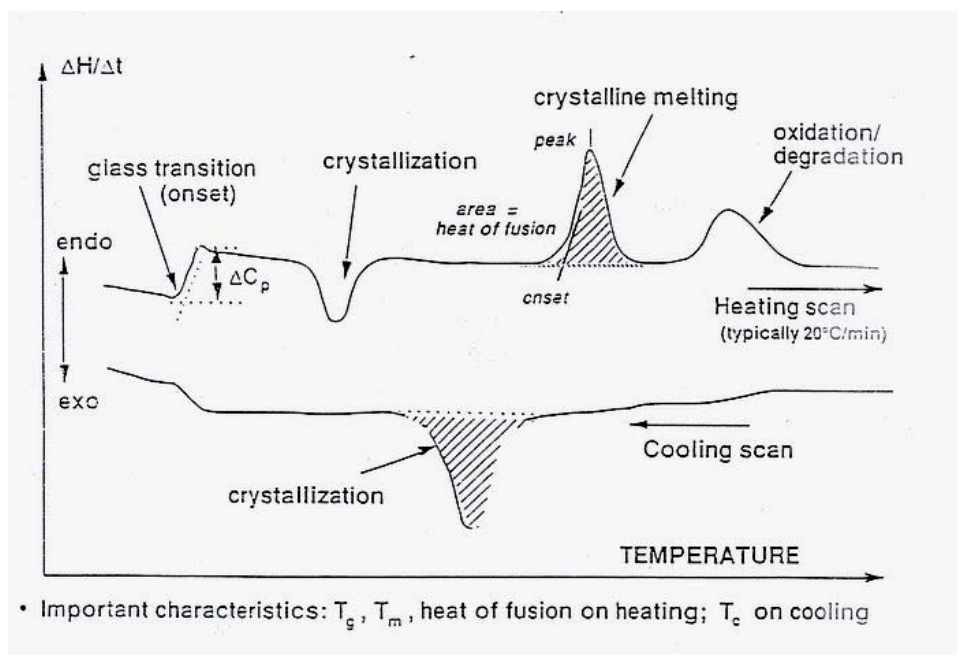


ภาพที่ 20 ตำแหน่งการจัดวางอุปกรณ์ของ DSC Apparatus

ที่มา: Gaelle and Helenne (2001)

อุปกรณ์ทั้ง 2 ตัวดังกล่าวมีหลักการทำงาน คือ ขณะทดสอบเครื่องจะพยายามรักษาอุณหภูมิของทั้ง 2 cup ให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด หากค่าอุณหภูมิของทั้ง 2 cup ที่วัดได้แตกต่างกัน อุปกรณ์ทำความร้อนก็จะทำงานจนกระทั่งอุณหภูมิของทั้ง 2 cup กลับมาใกล้เคียงกันอีกครั้ง

อุปกรณ์หลักที่สำคัญอีกตัวหนึ่งของการทดสอบ Differential Scanning Calorimetry (DSC) คือ เครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องคอมพิวเตอร์จะใช้ควบคุมค่าการทดสอบต่างๆ เช่น ช่วงอุณหภูมิของการทำงาน อัตราการให้ความร้อนหรืออัตราการให้ความเย็น การไหลของ purge gas รวมถึงรวบรวมข้อมูล เก็บข้อมูล และแสดงข้อมูลที่ได้อาจการทดสอบในหลายๆรูปแบบ การใช้ประโยชน์จากเครื่อง DSC ในปัจจุบันจะใช้ทดสอบกับสารจำพวกพอลิเมอร์เป็นส่วนใหญ่ โดยค่าที่เครื่อง DSC สามารถทดสอบได้มีดังที่แสดงในภาพที่ 21 (ค่าที่แสดงในภาพที่ 21 ไม่จำกัดเฉพาะแต่คุณสมบัติของพอลิเมอร์เท่านั้น)



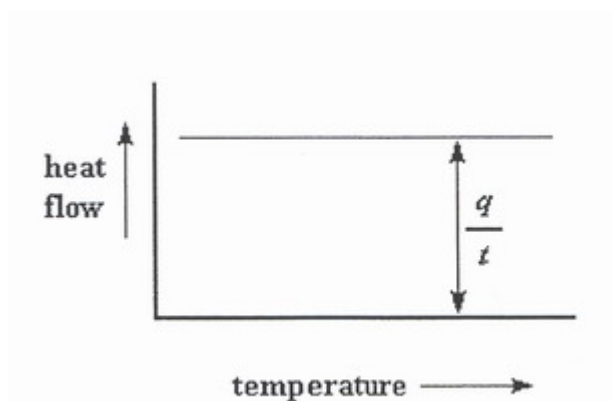
ภาพที่ 21 คุณสมบัติต่างๆที่ทดสอบได้จากเครื่อง DSC

ที่มา: Gaelle and Helenne (2001)

ภาพที่ 21 จะแสดงการหาค่าคุณสมบัติต่างๆจากกราฟที่ได้จากการทดสอบสารตัวอย่างด้วยเครื่อง DSC โดยในเอกสารนี้จะขอกล่าวถึงรายละเอียดการหาค่าจากกราฟผลการทดสอบเฉพาะ 3 ค่าที่เกี่ยวข้องกับโครงานนี้เท่านั้น ได้แก่ ค่าความจุความร้อน ค่าความร้อนแฝงและจุดหลอมเหลวของสาร

1) ค่าความจุความร้อน (heat capacity)

เมื่อเริ่มต้นให้ความร้อนแก่ทั้งสอง cup ที่ใช้ทดสอบ เครื่องคอมพิวเตอร์จะพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความร้อนของทั้งสอง cup กับอุณหภูมิ หรือในอีกความหมายหนึ่ง ก็เป็นกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่พอลิเมอร์ดูดซึมกับอุณหภูมิ ภาพที่ 22 แสดงตัวอย่างกราฟในช่วงเริ่มแรกของการทดสอบ



ภาพที่ 22 ตัวอย่างกราฟในช่วงเริ่มแรกของการทดสอบสารตัวอย่างด้วยเครื่อง DSC
ที่มา: Gaelle and Helenne (2001)

จากภาพที่ 22 ค่า heat flow คือ ค่าความร้อน q ที่เป็นอัตราส่วนกับเวลา t และค่า heating rate ซึ่งผู้ทดสอบจะสามารถกำหนดได้ที่เครื่องคอมพิวเตอร์ก่อนทำการทดสอบ คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น T ต่อเวลา t ดังนี้

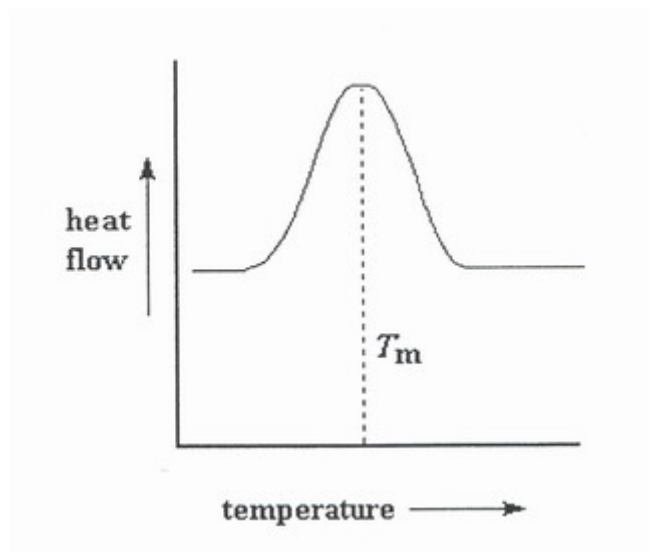
$$\frac{\text{Heat}}{\text{Time}} = \frac{q}{t} = \text{Heat Flow}$$

$$\frac{\text{Temperature Increase}}{\text{Time}} = \frac{\Delta T}{t} = \text{Heating Rate}$$

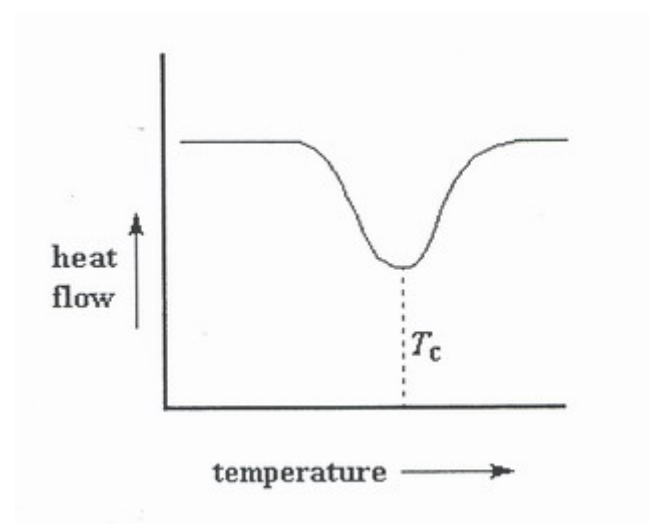
จากสมการด้านบน เมื่อนำ heat flow มาหารด้วย heating rate ค่าที่ได้จะเป็นค่าความร้อนที่ให้หารด้วยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งก็คือค่าความจุความร้อนนั่นเอง

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

2) Melting temperature และ Crystallization temperature



ภาพที่ 23 กราฟที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC สำหรับกระบวนการดูดความร้อน
ที่มา: Gaelle and Helenne (2001)



ภาพที่ 24 กราฟที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC สำหรับกระบวนการคายความร้อน
ที่มา: Gaelle and Helenne (2001)

จากกราฟภาพที่ 23 เป็นกระบวนการดูดความร้อน ต้องให้พลังงานเพิ่มเพื่อให้พอลิเมอร์หลอมเหลว อุณหภูมิที่จุดยอดสุดของกราฟคือ จุดหลอมเหลว (T_m) กราฟภาพที่ 24 แสดงกรณีที่เป็นกระบวนการคายพลังงาน อุณหภูมิที่จุดต่ำสุดของกราฟจะเรียกว่า crystallization temperature (T_c)

3) Latent heat

ค่า latent heat of melting และ latent heat of crystallization หาจากพื้นที่ใต้กราฟ ตัวอย่างกราฟที่แสดงในภาพที่ 23 ค่า latent heat of melting คือ พื้นที่ใต้กราฟช่วงตั้งแต่เส้นกราฟเริ่มเพิ่มสูงขึ้นไปหาจุดสูงสุดจนกระทั่งกลับมาที่เส้นระดับปกติอีกครั้ง เช่นเดียวกับกราฟภาพที่ 24 ค่า latent heat of crystallization จะอ่านจากพื้นที่ใต้กราฟช่วงที่กราฟเริ่มลดต่ำลงจนถึงจุดต่ำสุดและกลับขึ้นไปอยู่ในระดับเดิมอีกครั้ง

อุปกรณ์และวิธีการ

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการผลิต Phase Change Material หรือ PCM ด้วยวิธี shape stabilized PCM โดยการทดลอง 2 การทดลอง โดยการทดลองที่ 1 จะเป็นการผลิต shape stabilized PCM ซึ่งการทดลองแบ่งเป็น 3 ชุด ดังนี้

ชุดที่ 1 ประกอบด้วย จี๊ฟี่งพาราฟินและ HDPE ซึ่งจะทำให้การปรับเปลี่ยนสัดส่วนปริมาณ paraffin : HDPE และหาสัดส่วนที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยคำนึงถึงค่าความร้อนแฝงและคุณสมบัติทางกลของผลิต ภัณฑ์เป็นหลัก

ชุดที่ 2 ประกอบด้วย จี๊ฟี่งพาราฟิน LDPE และ EVA ซึ่งจะทำให้การปรับเปลี่ยนสัดส่วน ปริมาณ paraffin : LDPE : EVA และหาสัดส่วนที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยคำนึงถึงค่าความร้อน แฝง ความคงทนต่อรอบการใช้งานในด้านคุณสมบัติทางความร้อน และคุณสมบัติทางกลของ ผลิตภัณฑ์เป็นหลัก

ชุดที่ 3 ประกอบด้วย จี๊ฟี่งพาราฟิน LDPE EVA และผงกราไฟท์ ซึ่งจะทำให้การปรับเปลี่ยน สัดส่วนปริมาณ paraffin : LDPE : EVA : Graphite และหาสัดส่วนที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดย คำนึงถึงค่าความร้อนแฝง ค่าความนำความร้อนและคุณสมบัติทางกลของผลิตภัณฑ์เป็นหลัก

จากนั้นทุกตัวอย่างจะทำการวิเคราะห์ ค่าคุณสมบัติทางความร้อนต่างๆ เช่น ค่าความร้อน แฝง ค่าความจุความร้อน ค่าความนำความร้อน ความคงทนต่อรอบการใช้งาน ค่าความร้อนแฝง ภายหลัง 20 รอบการใช้งาน heating และ cooling curve รวมไปถึงคุณสมบัติทางกลศาสตร์

สำหรับการทดลองที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบการลดอุณหภูมิของน้ำที่บรรจุในแก้วทดสอบ โดยมีสารที่บรรจุในช่องว่างระหว่างแก้ว 2 ชั้น คือ อากาศ และจี๊ฟี่งพาราฟิน โดยรายละเอียดการทดลองทั้งหมด แสดงดังนี้

1. การผลิต Shape stabilized PCM

แสดงขั้นตอนการผลิต shape stabilized PCM จากวัตถุดิบ โดยใช้ขี้ผึ้งพาราฟินเป็น PCM

วัตถุดิบ

เพื่อทำการผลิต shape stabilized PCM ขึ้น

อุปกรณ์ที่ใช้

1. ถ้วยสเตนเลสขนาดกลางบรรจุ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร
2. อุปกรณ์ให้ความร้อน (heating mantle) ยี่ห้อ HANABISHI รุ่น NES-145
3. เครื่องปั่นไฟฟ้า พร้อมใบกวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน 7 เซนติเมตร
4. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 3 ตำแหน่ง ยี่ห้อ METTLER TOLEDO
5. โมลด์ (mold) ซิลิโคนขนาด 30x30 เซนติเมตร
6. เครื่องปั่นไฟฟ้าขนาดเล็กยี่ห้อ OTTO รุ่น SUPER BLENDER
7. เครื่องขึ้นเรือนเรซิน (Hot mount) ยี่ห้อ IMPTECH รุ่น PA 30
8. เทอร์โมมิเตอร์ช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 220 องศาเซลเซียส
9. นาฬิกาจับเวลา



ภาพที่ 25 ชุดอุปกรณ์ประกอบด้วย ถ้วยสเตนเลส เครื่องปั่นไฟฟ้าและอุปกรณ์ให้ความร้อน



ภาพที่ 26 เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 3 ตำแหน่ง



ภาพที่ 27 Silicon Mold



ภาพที่ 28 เครื่องปั่นไฟฟ้าขนาดเล็ก



ภาพที่ 29 เครื่อง Hot mount

สารเคมีที่ใช้

1. จี๊ฟี่งพาราฟิน (paraffin wax) ชนิด fully refined paraffin wax รุ่น F 140-145Ef
2. พอลิเอทิลีน (Polyethylene) ซึ่งประกอบด้วยชนิดความหนาแน่นสูง (High density Polyethylene, HDPE) รุ่น 5604 TTE และชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density Polyethylene, LDPE) รุ่น 1905f TTE

3. เอทิลีน ไวนิล อะซิเตท (Ethylene vinyl acetate, EVA) รุ่น N8038 มีไวนิล อะซิเตท 18% จาก IRPC

4. ผงกราไฟท์ รุ่น EDM 96/97

วิธีการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักขี้ผึ้งพาราฟิน พอลิเมอร์และผงกราไฟท์ให้ได้ปริมาณตามต้องการ ซึ่งแต่ละชุดการทดลองจะมีปริมาณสารแตกต่างกันไป แสดงดังตารางที่ 9 ถึง 11

ตารางที่ 9 ปริมาณสัดส่วนพาราฟินและ HDPE ในการทดลองชุดที่ 1

ตัวอย่าง	พาราฟิน	HDPE
1	50	50
2	60	40
3	70	30
4	75	25

ตารางที่ 10 ปริมาณสัดส่วนพาราฟิน LDPE และ EVA ในการทดลองชุดที่ 2

ตัวอย่าง	พาราฟิน	LDPE	EVA
5	55	45	0
6	55	30	15
7	55	22.5	22.5
8	55	15	30
9	55	0	45

ตารางที่ 11 ปริมาณสัดส่วนพาราฟิน LDPE EVA และผงกราฟไฟท์ ในการทดลองชุดที่ 3

ตัวอย่าง	พาราฟิน	LDPE	EVA	ผงกราฟไฟท์
10	55	27	13	5
11	55	25	10	10
12	55	20	10	15
13	55	15	10	20

2. ทำการจัดชุดอุปกรณ์การทดลอง ดังภาพที่ 25 จากนั้นนำขี้ผึ้งพาราฟินที่ขังได้ใส่ถ้วยสแตนเลสแล้วนำไปละลายบน hot plate ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

3. เมื่อขี้ผึ้งพาราฟินละลายสมบูรณ์จึงเปิดเครื่องปั่นไฟฟ้า โดยตั้งความเร็วรอบที่ 420 รอบต่อนาที (ในกรณีที่ต้องใส่ผงกราฟไฟท์ให้ใส่ในขั้นตอนนี้) จากนั้นค่อยๆ ใส่เม็ดพอลิเมอร์ซ้ำๆ (กรณีที่มีทั้ง LDPE และ EVA ด้วยให้นำเม็ดพลาสติก 2 ชนิดนี้มาผสมกันก่อน) โดยปรับอุณหภูมิคงที่ที่ 150 องศาเซลเซียส และในกรณีที่มีปริมาณ EVA สูง 45% ให้ใช้ความร้อนที่ 200 องศาเซลเซียส

4. ปั่นผสมนาน 90 นาทีหรือจนกว่าพอลิเมอร์และขี้ผึ้งพาราฟินจะละลายจนผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวแน่นอนแล้ว จากนั้นเทใส่โมลด์อย่างระมัดระวัง แล้วรอให้เจลที่ได้เย็นลงจนกลายเป็นของแข็งใช้เวลาประมาณ 60 นาที จึงเอาตัวอย่างออกจากโมลด์ แสดงดังภาพที่ 30



(a) ขั้นตอนการเทเจลใส่โมลด์



(b) ภาพชิ้นงานหลังจากเอาออกจากโมลด์

ภาพที่ 30 ขั้นตอนการเทเจลใส่โมลด์และหลังจากเอาออกจากโมลด์

5. นำเอาชิ้นงานที่ได้มาปั่นด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าขนาดเล็ก (เครื่องปั่นผลไม้) จนชิ้นงานมีขนาดละเอียดเป็นผง แสดงดังภาพที่ 31

6. นำผงชิ้นงานเข้าเครื่อง Hot mount เพื่อทำการขึ้นรูป โดยใช้อุณหภูมิในการทดลอง 150 องศาเซลเซียส และความดัน 400 กิโลปาสกาล ใช้เวลา 13 นาที และใช้เวลา cooling นาน 9 นาที จึงนำผลิตภัณฑ์ออกมา โดยรูปตัวอย่างชิ้นงาน shape stabilized PCM แสดงดังภาพที่ 32 โดยชิ้นงานที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.9 เซนติเมตร หนา 1.3 เซนติเมตร



(a) ผงชิ้นงานกรณีไม่มีกราไฟท์



(b) ผงชิ้นงานกรณีมีกราไฟท์ผสม

ภาพที่ 31 ผงชิ้นงานหลังจากผ่านเครื่องปั่นไฟฟ้าละเอียด



(a) Shape stabilized PCM ชนิดไม่มีกราไฟท์ผสม (b) Shape stabilized PCM ชนิดมีกราไฟท์ผสม

ภาพที่ 32 Shape stabilized PCM

2. การศึกษาหาค่าสมบัติทางความร้อน

การหาค่าความจุความร้อนจำเพาะ Heat capacity (C_p) และ ค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลว หรือ Latent heat of fusion (λ) ของซีพีงพาราฟิน โดยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)

วัตถุประสงค์

เพื่อหาค่าความจุความร้อนจำเพาะ Heat capacity (C_p) และ ค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลว หรือ Latent heat of fusion (λ) ของ shape stabilized PCM

สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

1. ซีพีงพาราฟิน LDPE HDPE EVA และ shape stabilized PCM ทั้ง 13 ตัวอย่าง
2. Cup บรรจุสารทดสอบ 2 Cup
3. ชุดทดสอบ DSC-TGA ยี่ห้อ TA INSTRUMENT รุ่น SDT 2860 ประกอบด้วย
 - ก. เครื่อง DSC-TGA ดังภาพที่ 18
 - ข. คอมพิวเตอร์
 - ค. ปืน
 - ง. แก๊สไนโตรเจน
 - จ. Stabilizer

วิธีการทดลอง

1. เปิดปืนและเตรียมน้ำที่ค้างอยู่ในปืนออกเป็นเวลานานประมาณ 5 นาที
2. เปิดวาล์วแก๊สไนโตรเจนและปรับอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเป็น 100 ลิตรต่อ
นาที
3. เปิดสวิตช์เครื่อง Stabilizer , เครื่อง DSC และคอมพิวเตอร์
4. เลือกโปรแกรม TA instrument → Wizard → DSC-TGA
5. บรรจุชิ้นงานตัวอย่างลงใน Pan ประมาณครึ่งหนึ่งของความจุของ Pan

6. เลือกให้อัตราการการเพิ่มอุณหภูมิ (heating Rate) กับสารทดสอบ 5 องศาเซลเซียสต่อ นาที และอุณหภูมิสุดท้ายที่ทำการทดสอบที่ 150 องศาเซลเซียส

7. นำ Pan ของชิ้นงานตัวอย่างและ Pan อ้างอิงบรรจุใน DSC Apparatus และเลือกเริ่มการ ทดลอง (start run) ในเครื่องคอมพิวเตอร์

8. เลือก TA Universal เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ

3. การศึกษาความคงทนต่อรอบการใช้งาน

การทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบจากลักษณะภายนอกที่ เปลี่ยนไป หรือเสื่อมสภาพไปต่อรอบการใช้งาน

วัตถุประสงค์

เพื่อเปรียบเทียบชิ้นงานแต่ละตัวอย่างในด้านความคงทนต่อรอบการใช้งานจากภาพถ่าย ลักษณะภายนอกของชิ้นงาน shape stabilized PCM

สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้

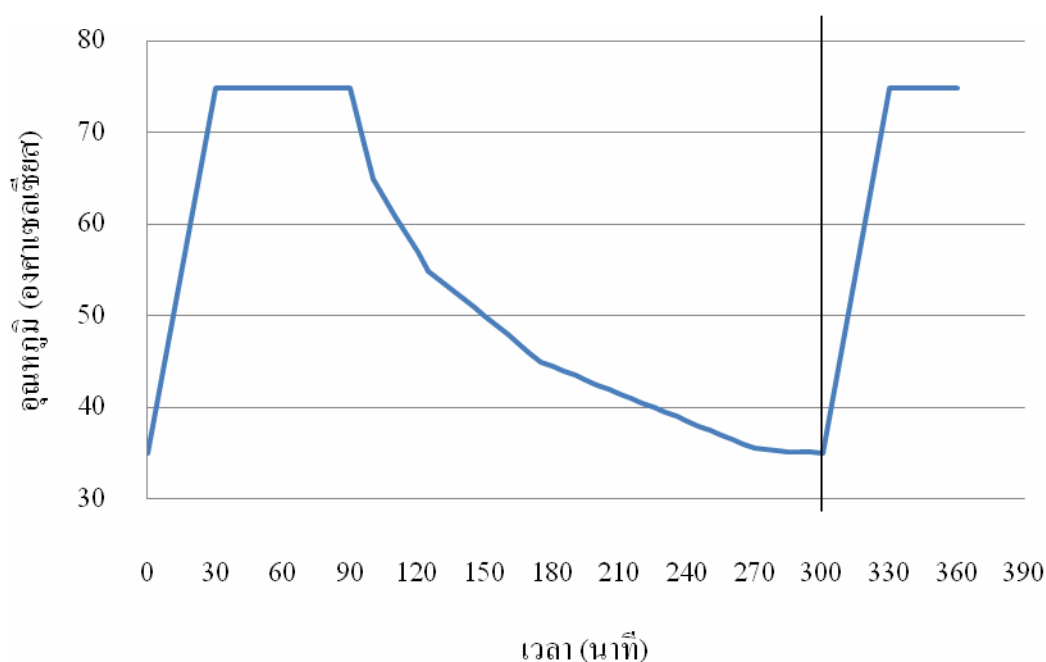
1. shape stabilized PCM ทั้ง 13 ตัวอย่าง
2. ถังพลาสติกขนาดเล็กเจาะรู
3. เครื่อง water bath ยี่ห้อ MEMMERT
4. นาฬิกาจับเวลา



ภาพที่ 33 เครื่อง water bath

วิธีการทดลอง

1. นำถุงพลาสติกขนาดเล็กมาเจาะรู โดยจำนวนรูของแต่ละถุงเท่ากัน เพื่อให้น้ำร้อนสามารถสัมผัสโดยตรงกับ shape stabilized PCM
2. นำ shape stabilized PCM ใส่ถุงพลาสติกและเขียนชื่อตัวอย่างบนถุง
3. ปรับอุณหภูมิในเครื่อง water bath เป็น 35 องศาเซลเซียส รอจนอุณหภูมิได้ แล้วนำเอา shape stabilized PCM ทั้ง 13 ตัวอย่างใส่ลงไป
4. ปรับอุณหภูมิในเครื่อง water bath เป็น 75 องศาเซลเซียส โดยเครื่องจะใช้เวลาประมาณ 30 นาทีจึงเพิ่มอุณหภูมิถึง 75 องศาเซลเซียส จากนั้นแช่ตัวอย่างทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง
5. ปรับอุณหภูมิน้ำลงมาเป็น 35 องศาเซลเซียส โดยเครื่องจะใช้เวลาประมาณ 3.5 ชั่วโมง อุณหภูมิจะลดลงถึง 35 องศาเซลเซียส จึงนับเป็น 1 cycle ซึ่งอุณหภูมิในเครื่อง water bath ในรอบ 1 cycle แสดงดังภาพที่ 34



ภาพที่ 34 1 รอบการใช้งาน (1 cycle) ใช้เวลา 300 นาที

6. ทำเช่นเดิมให้ครบ 20 cycles โดยถ่ายภาพการเปลี่ยนแปลงก่อนกับหลัง cycles เพื่อนำมาเปรียบเทียบลักษณะของผลิตภัณฑ์ในด้านความคงทนต่อรอบการใช้งานที่เปลี่ยนไปในแต่ละตัวอย่าง

4. การศึกษาหาค่าสมบัติทางความร้อนหลังผ่านการใช้งาน 20 รอบ

การทดลองนี้จะทำการทดลองเหมือนการทดลองที่ 2 คือหาค่าความจุความร้อนจำเพาะ Heat capacity (C_p) และ ค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลว หรือ Latent heat of fusion (λ) ของ shape stabilized PCM หลังผ่านรอบการใช้งาน โดยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)

วัตถุประสงค์

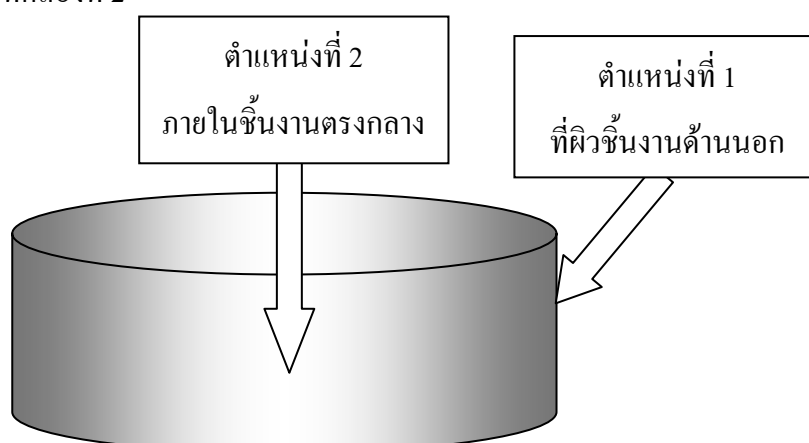
เพื่อหาค่าความจุความร้อนจำเพาะ Heat capacity (C_p) และ ค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลว หรือ Latent heat of fusion (λ) ของ shape stabilized PCM หลังผ่านรอบการใช้งาน

สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

1. shape stabilized PCM ทั้ง 13 ตัวอย่างที่ผ่านรอบการใช้งาน 20 รอบ โดยจะวิเคราะห์ที่ 2 ตำแหน่ง ดังภาพที่ 35
2. Cup บรรจุสารทดสอบ 2 Cup
3. ชุดทดสอบ DSC-TGA ยี่ห้อ TA INSTRUMENT รุ่น SDT 2860 ประกอบด้วย
 - ก. เครื่อง DSC-TGA
 - ข. คอมพิวเตอร์
 - ค. ปืน
 - ง. แก๊สไนโตรเจน
 - จ. Stabilizer

วิธีการทดลอง

เหมือนกับการทดลองที่ 2



ภาพที่ 35 ตำแหน่งที่จะนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

5. การศึกษาหาค่าความหนาแน่นของ Shape stabilized PCM

การทดลองนี้จะทำการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของ shape stabilized PCM โดยเครื่อง Multipycnometer

วัตถุประสงค์

เพื่อหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานแต่ละชิ้นงานและเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของชิ้นงานว่าปัจจัยใดที่มีผลต่อการเพิ่มหรือลดของค่าความหนาแน่นชิ้นงาน

สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

1. shape stabilized PCM ทั้ง 13 ตัวอย่าง
2. เครื่อง Multipycnometer ยี่ห้อ QUANTA CHROME
3. ก๊าซฮีเลียม



ภาพที่ 36 เครื่อง Multipycnometer

วิธีการทดสอบ

วิธีการ Calibrate

1. ใส่ Large sample cell พร้อม Large sphere ลงในช่อง ปิดฝา
2. เปิด Valve I และ II
3. ปิด Valve ให้ชี้ไปที่ CELL
4. เปิด Gas out และ Gas in (ปรับ Rate ให้อ่านค่าได้ 1 PSI)
5. ปลดปล่อยให้ Purge นาน 5 นาที
6. ปิด Gas in รอจนตัวเลขเป็นศูนย์ (อาจช่วยปรับ Zero)
7. ปิด Valve ให้ชี้ไปที่ REF
8. ปิด Gas out
9. เปิด Gas in จนอ่านค่าได้ประมาณ 17 PSI แล้วปิด Gas in จดค่าที่อ่านได้เป็น $P_1 \text{ large}$
10. ปิด Valve ให้ชี้ไปที่ CELL จดค่าที่อ่านได้เป็น $P_2 \text{ large}$
11. เปิด Gas out
12. นำ Large sphere ออกจาก Cell แล้วปิดฝา
13. ทำตามข้อ 3-11 จดค่าที่อ่านได้เป็น $P'_1 \text{ large}$ และ $P'_2 \text{ large}$ ตามลำดับ
14. นำไปคำนวณค่า $V_R \text{ Large}$ ตามสูตร

$$V_R \text{ large} = \frac{V_{\text{cal large}}}{[(P'_1 \text{ large}/P'_2 \text{ large}) - 1] - [(P_1 \text{ large}/P_2 \text{ large}) - 1]}$$

$$(V_{\text{cal large}} = 56.559 \text{ cm}^3)$$

15. นำค่า $V_R \text{ large}$ ไปคำนวณค่า $V_C \text{ large}$ ตามสูตร

$$V_C \text{ large} = V_{\text{cal large}} + V_R \text{ large}[(P_1 \text{ large}/P_2 \text{ large}) - 1]$$

วิธีการหาค่าปริมาตร, V_p

1. เปิด Gas in และ Gas out ที่ตัวเครื่อง
2. ตั้ง Gas Regulator ไว้เกิน 20 PSIG เล็กน้อย (ห้ามเกิน 25 PSIG)
3. เปิดถัง Gas
4. เลือก Set...Reference Volume ตามขนาดของ Sample cell ที่จะใช้
5. ใส่ตัวอย่างลงใน Sample cell พร้อมปิดฝาให้แน่น

6. ปิด VALVE ชี๊วไปที่ CELL เปิด Gas in และ Gas out ให้ตัวเลข Flow rate เท่ากับ 1 PSI รอ 5 นาที จากนั้นปิด Gas in จนตัวเลขเท่ากับศูนย์ (อาจช่วยปรับ Zero)
7. ปิด Gas out
8. ปิด VALVE ชี๊วไปที่ REF
9. เปิด Gas in รอจนอ่านค่าได้ประมาณ 17 PSIG ปิด Gas in จดค่าที่อ่านได้เป็น P_1
10. ปิด VALVE ชี๊วไปที่ CELL จดค่าที่อ่านได้เป็น P_2
11. เปิด Gas out เพื่อไล่ Gas ออก
12. นำค่า P_1 และ P_2 ไปคำนวณปริมาตรสารตัวอย่างตามสูตร

$$V_p = V_c - V_R[(P_1/P_2) - 1]$$

V_p = Volume of sample (cm^3)

V_c = Volume of sample cell (cm^3)

V_R = Volume of Reference (cm^3)

13. จากนั้นคำนวณค่าความหนาแน่นจากสูตร $D = M/V$

6. การศึกษาหาค่าการทดสอบแรงกด (Compression test)

การทดลองนี้จะทำการทดสอบแรงกดลงบนชิ้นงาน shape stabilized PCM โดยเครื่องทดสอบแรงกด

วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน และเปรียบเทียบความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของชิ้นงาน ลักษณะการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน ระยะของชิ้นงานที่ถูกกดต่อแรงกดชิ้นงานแต่ละตัวอย่าง รวมถึงหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน

สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

1. shape stabilized PCM ทั้ง 13 ตัวอย่าง

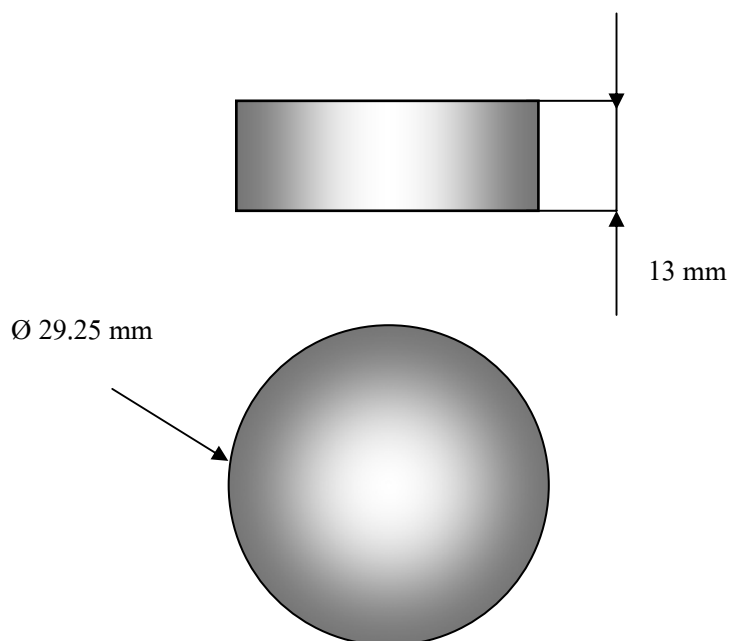
2. เครื่องทดสอบแรงกดยี่ห้อ HOUNSFIELD รุ่น H50KS



ภาพที่ 37 เครื่องทดสอบแรงกด

วิธีการทดสอบ

1. เตรียมชิ้นงานให้มีลักษณะดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกด

2. จัดชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงกดใส่หัวกด และตั้งค่าอัตราการกดที่ 3 mm/s
3. วางชิ้นงานบนแท่นรับแรงกดและเริ่มเดินเครื่อง
4. กดจนชิ้นงานแตก และบันทึกกราฟแสดงผล

7. การศึกษาการทดสอบถ่ายภาพ SEM (Scanning Electron Microscope)

การทดสอบนี้จะทำการถ่ายภาพ SEM โดยเครื่อง SEM ยี่ห้อ PHILIBS รุ่น XL30

วัตถุประสงค์

เพื่อคุณลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน ในระดับไมโครสเกล และเปรียบเทียบลักษณะแต่ละชิ้นงาน

สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

1. shape stabilized PCM ชุดละ 1 ตัวอย่าง
2. เครื่อง SEM ยี่ห้อ PHILIBS รุ่น XL30



ภาพที่ 39 เครื่อง SEM ยี่ห้อ PHILIBS รุ่น XL30

วิธีการทดสอบ

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

8. การศึกษาการทดสอบหาค่าความนำความร้อน (Thermal conductivity)

การทดลองนี้จะทำการทดลองหาค่าความนำความร้อนของชิ้นงานที่ 6, 10, 11, 12, 13

วัตถุประสงค์

หาค่าความนำความร้อนของชิ้นงานที่มีปริมาณสัดส่วนผงกราฟไฟต์แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบและหาค่าความสัมพันธ์

สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

1. shape stabilized PCM ทั้ง 5 ตัวอย่าง (ตัวอย่างที่ 6, 10, 11, 12, 13)
2. ชุดเครื่องทดสอบค่าความนำความร้อนยี่ห้อ Hot disk



ภาพที่ 40 ชุดเครื่องมือหาค่าความนำความร้อน

วิธีการทดลอง

1. เปิดเครื่องทดสอบและจัดอุปกรณ์ทดสอบ
2. นำชิ้นงาน 2 ชิ้นวางลงบน plate ของเครื่อง โดยทั้งสองชิ้นงานอยู่ระหว่างตัวเซ็นเซอร์ให้ความร้อน ดังภาพที่ 43
3. เริ่มการทดสอบ โดยเครื่องจะทำงานอัตโนมัติและบันทึกผลการทดสอบ

9. การศึกษาค่า Heating และ Cooling Curve

การทดลองนี้จะทำการทดลองหากราฟ heating curve และ cooling curve เพื่อเปรียบเทียบตัวอย่างในชุดที่ 3

วัตถุประสงค์

ทำการทดลองหากราฟ heating curve และ cooling curve เพื่อเปรียบเทียบชิ้นงานในชุดที่ 3 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในชิ้นงาน เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมภายนอกเปลี่ยนแปลงว่าแตกต่างกันอย่างไร และปริมาณสัดส่วนของกราฟไฟท์ในชิ้นงานมีผลต่อกราฟอย่างไร

สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

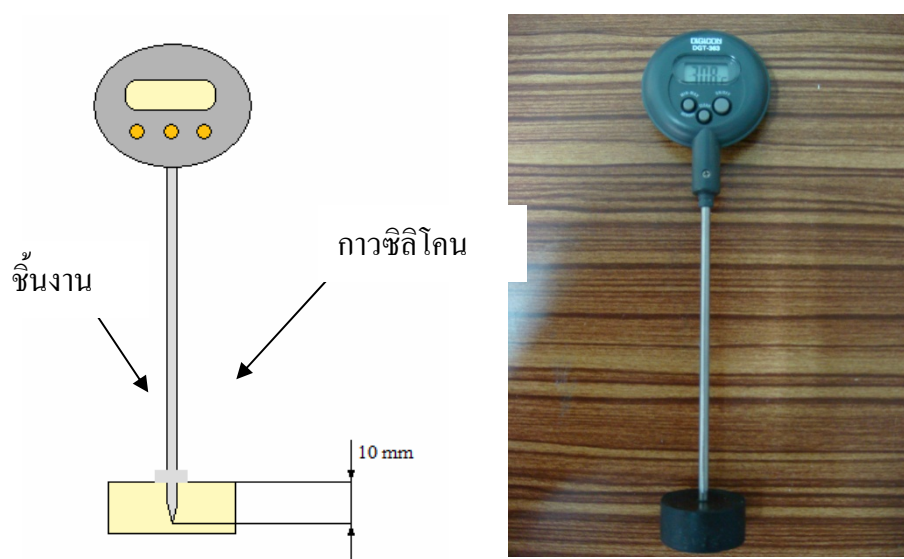
1. shape stabilized PCM ทั้ง 5 ตัวอย่าง (ตัวอย่างที่ 6, 10, 11, 12, 13)
2. เทอร์โมมิเตอร์
3. เครื่อง Water bath
4. ชุดแกนเหล็กจับชิ้นงาน
5. กาวซิลิโคน



ภาพที่ 41 เทอร์โมมิเตอร์

วิธีการทดลอง

1. นำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้ชิ้นงานนุ่มขึ้นพอประมาณ
2. นำเทอร์โมมิเตอร์เสียบลงไปตรงกลางชิ้นงาน โดยให้ลึกลงไปในตัวชิ้นงาน 10 mm
3. รอให้ชิ้นงานเย็นตัวลงประมาณ 60 นาที จนชิ้นงานแข็งตัวเป็นปกติ
4. นำกาวซิลิโคนมาหยอดลงบนผิวชิ้นงานบริเวณรอบๆเทอร์โมมิเตอร์ เพื่อป้องกันน้ำไหลเข้าไปด้านในชิ้นงาน
5. รอกันกว่ากาวซิลิโคนแห้งสนิท และทดสอบความสมบูรณ์ของอุปกรณ์



ภาพที่ 42 ลักษณะอุปกรณ์และชิ้นงานทดสอบ heating & cooling curve

6. นำชิ้นงานที่มีเทอร์โมมิเตอร์เสียบอยู่ไปแช่ในเครื่อง water bath ที่มีน้ำอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และรอจนอ่านค่าอุณหภูมิที่เทอร์โมมิเตอร์ได้ 30 องศาเซลเซียส
7. ย้ายชิ้นงานไปยังเครื่อง water bath ที่มีน้ำอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เริ่มบันทึกเมื่ออุณหภูมิ 30.7 องศาเซลเซียส
8. บันทึกอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ทุก 10 วินาที จนอุณหภูมิชิ้นงานเพิ่มขึ้นเป็น 60 องศาเซลเซียส
9. รีบย้ายชุดชิ้นงานไปยังเครื่อง water bath ที่มีน้ำอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส
10. บันทึกอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ทุก 10 วินาที จนอุณหภูมิชิ้นงานลดลงเป็น 30.7 องศาเซลเซียส
11. นำค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในชิ้นงานและเวลามาพล็อตกราฟ



ภาพที่ 43 การทดลอง heating & cooling curve

10. การศึกษาการทดสอบแก้วสองชั้น

การทดลองที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบการลดอุณหภูมิของน้ำที่บรรจุในแก้วทดลอง 2 ชั้นแบบต่างๆ

วัตถุประสงค์

เพื่อเปรียบเทียบการลดอุณหภูมิของน้ำที่บรรจุในแก้วทดลอง 2 ชั้นแบบต่างๆ

อุปกรณ์

1. บีกเกอร์ ขนาด 1,000 มิลลิตร
2. เทอร์โมมิเตอร์
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก
4. Hot plate
5. นาฬิกาจับเวลา
6. ฝาฟลอยปิดแก้วน้ำทดสอบ
7. แก้วทดสอบ แก้ว 2 ชั้นภายในเป็นฉนวนพาราฟิน 90 กรัม
8. แก้วทดสอบ แก้ว 2 ชั้นภายในเป็นอากาศ

วิธีการทดลอง

1. ชั่งน้ำให้ได้น้ำหนัก 350 กรัม โดยเครื่องชั่งไฟฟ้าในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร
2. นำบีกเกอร์ที่ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระดาษฟลอยมีรูสำหรับเทอร์โมมิเตอร์ให้ความร้อนด้วย hot plate วัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์ขณะให้ความร้อนแก่น้ำ จนกระทั่งอุณหภูมิประมาณ 85 องศาเซลเซียส
3. นำน้ำมาเทใส่ในแก้วสองชั้นระหว่างชั้นไม่มีฉีฉีงพาราฟิน ที่วางบนที่รองแก้วโดยใช้ที่คิบบีกเกอร์ แล้วทำการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิของน้ำในแก้วทุก 30 วินาทีและบันทึก
4. ทำการทดลองซ้ำ โดยใช้ แก้วสองชั้นระหว่างชั้นมีฉีฉีงพาราฟิน 90 กรัม
5. นำผลการทดลองที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำกับเวลาเพื่อศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในแก้วแต่ละแบบ และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำหรือฉีฉีงพาราฟินที่บรรจุภายในช่องว่างของแก้วกับเวลา เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของสารที่บรรจุภายในช่องว่างของแก้วแต่ละแบบ

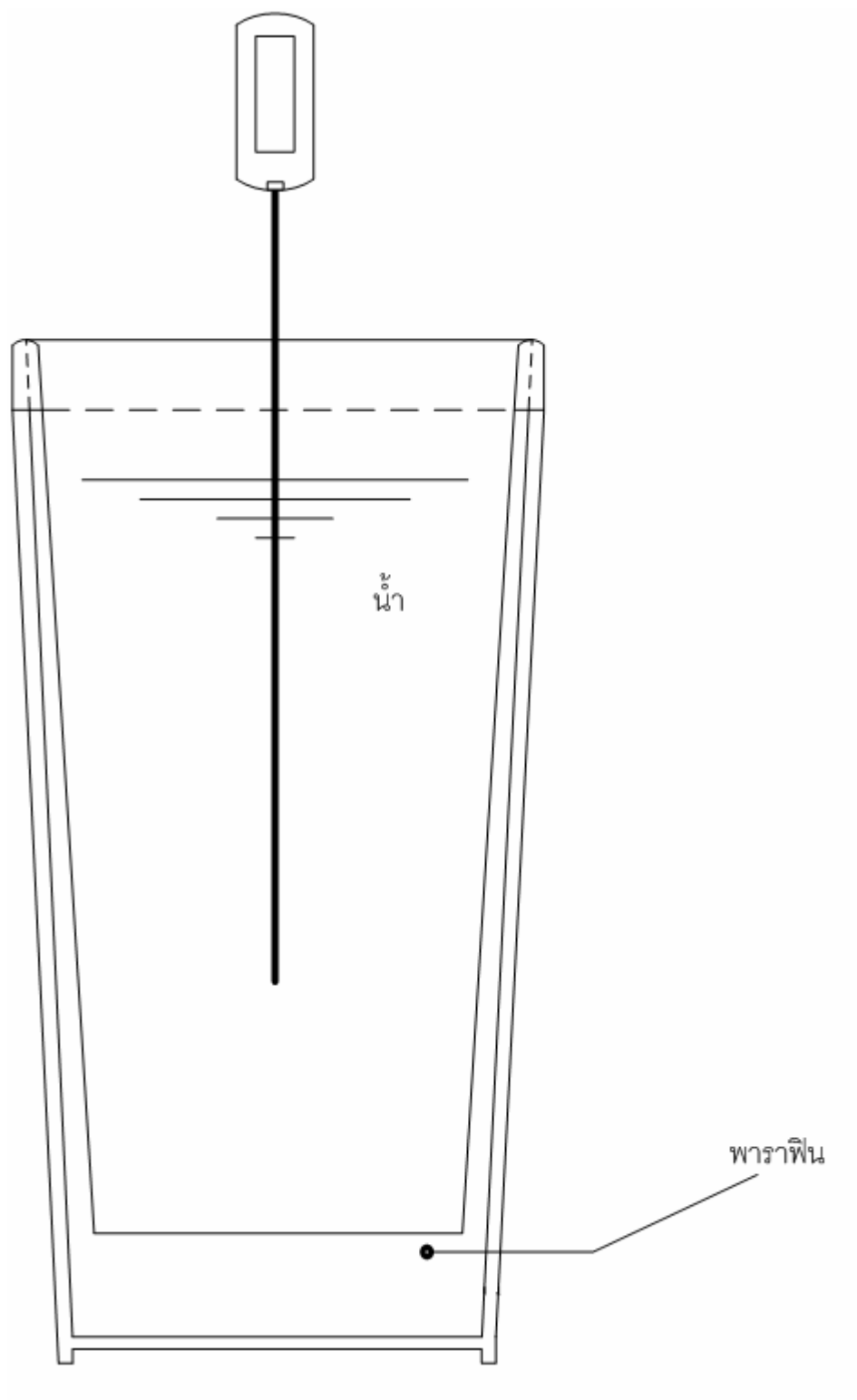


(a)

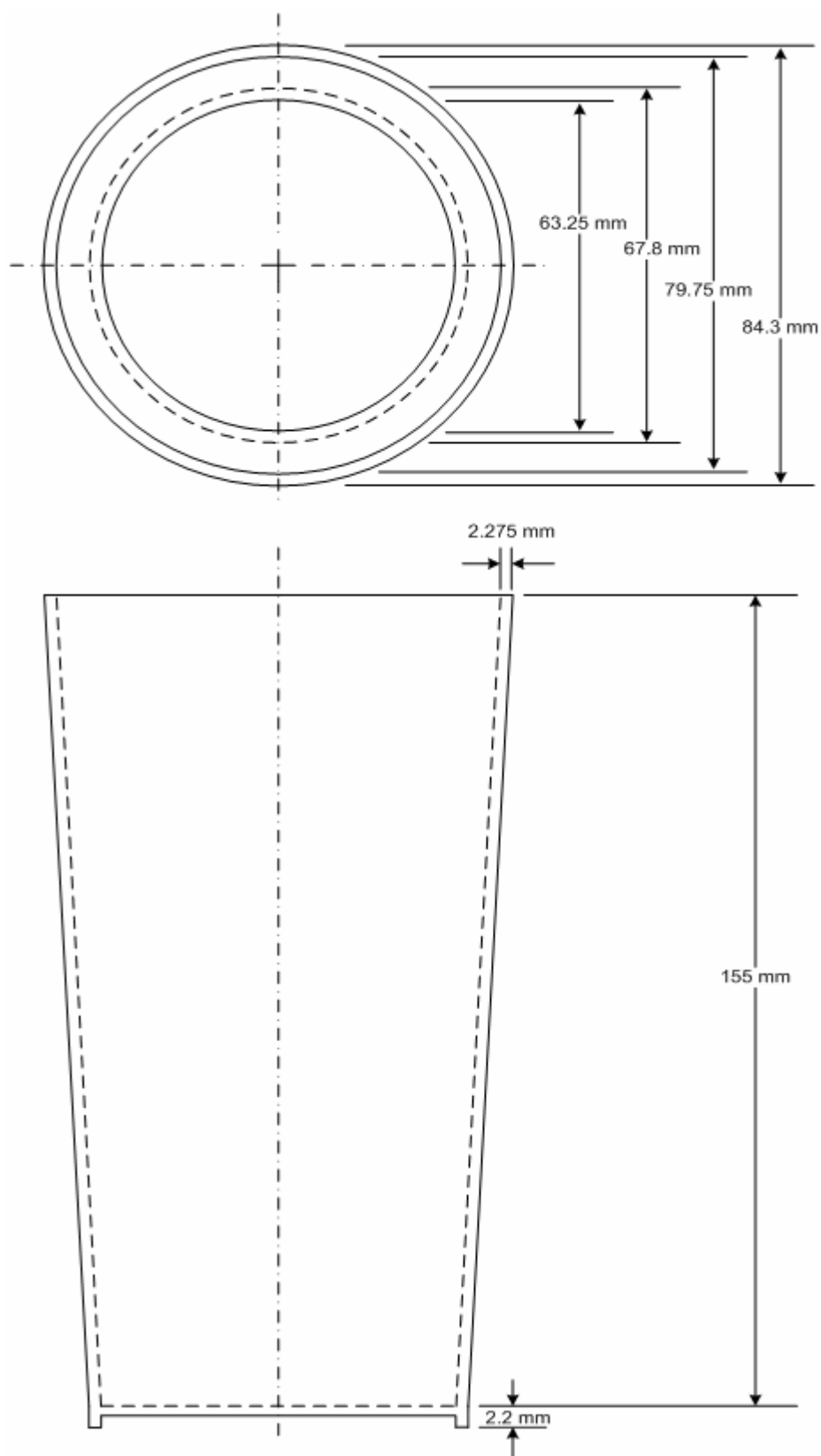


(b)

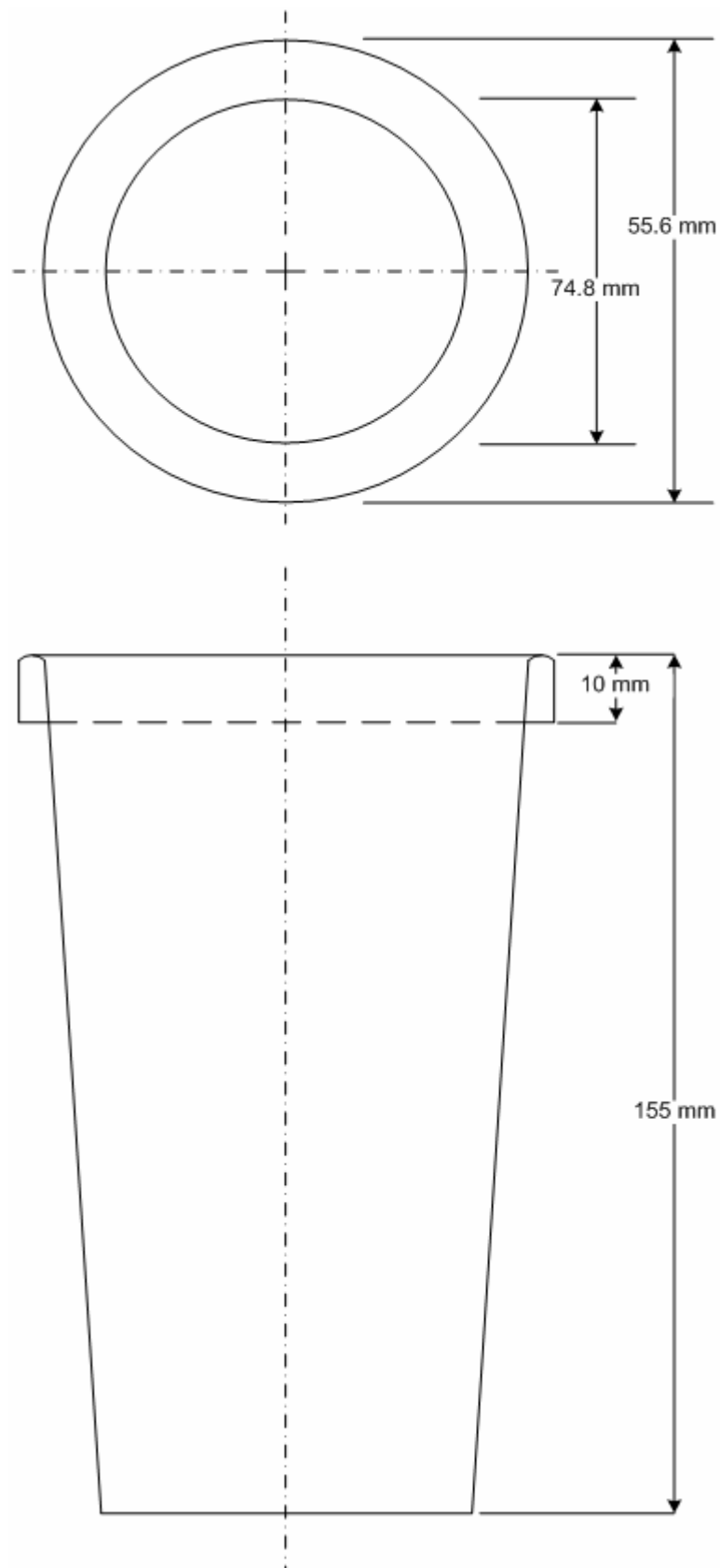
ภาพที่ 44 (a) การทดลองแก้วสองชั้นที่มีพาราฟินภายในระหว่างชั้น
(b) การทดลองแก้วสองชั้นที่มีอากาศภายในระหว่างชั้น



ภาพที่ 45 ลักษณะและขนาดแก้วทดลอง 2 ชั้นขนาดใหญ่ที่ใช้ทดสอบ



ภาพที่ 46 ลักษณะและขนาดแก้วทดลองชั้นนอกที่ใช้ทดสอบ



ภาพที่ 47 ลักษณะและขนาดแก้วทดลองขนาดใหญ่ชั้นในที่ใช้ทดสอบ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการผลิต Phase Change Material หรือ PCM ด้วยวิธี shape stabilized PCM โดยการทดลอง 2 การทดลอง โดยการทดลองที่ 1 จะเป็นการผลิต shape stabilized PCM ซึ่งการทดลองแบ่งขั้นตอนการผลิตเป็น 3 ชุด ดังนี้

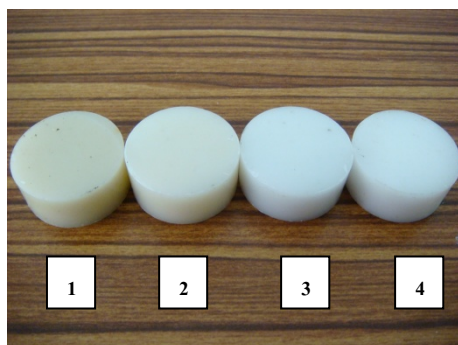
1. ชุดที่ 1 ประกอบด้วย จี๊พิ้งพาราฟินและ HDPE
2. ชุดที่ 2 ประกอบด้วย จี๊พิ้งพาราฟิน LDPE และ EVA
3. ชุดที่ 3 ประกอบด้วย จี๊พิ้งพาราฟิน LDPE EVA และผงกราไฟท์

จากนั้นทุกตัวอย่างจะทำการวิเคราะห์ ค่าคุณสมบัติทางความร้อนต่างๆ เช่น ค่าความร้อนแฝง ค่าความจุความร้อน ค่าความนำความร้อน ความคงทนต่อรอบการใช้งาน ค่าความร้อนแฝงภายหลัง 20 รอบการใช้งาน heating & cooling curve รวมไปถึงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ และสำหรับการทดลองที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบการลดอุณหภูมิของน้ำที่บรรจุในแก้วทดสอบ โดยมีสารที่ใช้บรรจุในช่องว่างระหว่างแก้ว 2 ชั้น คือ อากาศ และจี๊พิ้งพาราฟิน โดยรายละเอียดผลการทดลองและการวิเคราะห์มีดังนี้

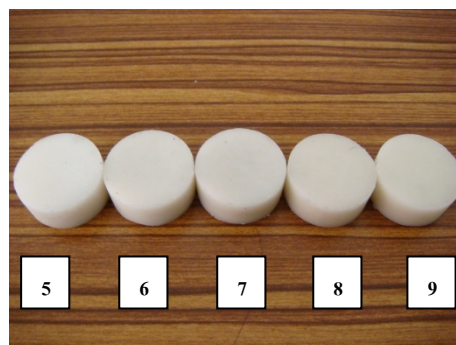
1. การศึกษาการผลิต Shape stabilized PCM

การผลิต shape stabilized PCM เริ่มต้นจากชั่งน้ำหนักจี๊พิ้งพาราฟิน พอลิเมอร์และผงกราไฟท์ให้ได้ปริมาณตามต้องการ จากนั้นนำจี๊พิ้งพาราฟินที่ชั่งได้ใส่ถ้วยสเตนเลสแล้วนำไปละลายบน hot plate ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เมื่อจี๊พิ้งพาราฟินละลายสมบูรณ์จึงเปิดเครื่องปั่นไฟฟ้า โดยตั้งความเร็วรอบที่ 420 รอบต่อนาที จากนั้นค่อยๆ ใส่เม็ดพอลิเมอร์ช้าๆ โดยปรับอุณหภูมิคงที่ที่ 150 องศาเซลเซียส และในกรณีที่มีปริมาณ EVA สูง 45% ให้ใช้ความร้อนที่ 200 องศาเซลเซียส ปั่นผสมนาน 90 นาที หรือจนกว่าพอลิเมอร์และจี๊พิ้งพาราฟินจะละลายจนผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวแน่นอนแล้ว จากนั้นเทใส่ mold อย่างระมัดระวัง แล้วรอให้เจลที่ได้เย็นลงจนกลายเป็นของแข็งใช้เวลาประมาณ 60 นาที จึงเอาตัวอย่างออกจาก mold จากนั้นนำเอาชิ้นงานที่ได้มาปั่นด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าขนาดเล็กจนชิ้นงานมีขนาดละเอียดเป็นผง จึงนำผงชิ้นงานเข้าเครื่อง Hot mount เพื่อทำการขึ้นรูป โดยใช้อุณหภูมิในการทดลอง 150 องศาเซลเซียส และความดัน 400 กิโลปาสกาล ใช้เวลา 13 นาที และใช้เวลา cooling นาน 9 นาที จึงนำผลิตภัณฑ์ออกมา โดยภาพตัวอย่างชิ้นงาน shape

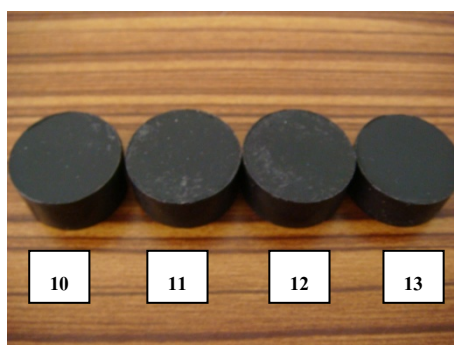
stabilized PCM โดยชิ้นงานที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.9 เซนติเมตร หนา 1.3 เซนติเมตร
ผลิตภัณฑ์แสดงดังภาพที่ 48



(a) ตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 (ชุดที่ 1)



(b) ตัวอย่างที่ 5 ถึง 9 (ชุดที่ 2)



(c) ตัวอย่างที่ 10 ถึง 13 (ชุดที่ 3)

ภาพที่ 48 ผลิตภัณฑ์ shape stabilized PCM

2. การศึกษาหาค่าสมบัติทางความร้อน

Differential Scanning Calorimetry หรือ DSC เป็นเทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน โดยใช้วิธีการพิจารณา Heat flow ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงของสารที่ทดสอบ เครื่อง DSC เป็นเครื่องมือที่ใช้ช่วยในการตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อนทั้งในเชิงฟิสิกส์และเคมีของสารที่ไม่ทราบส่วนประกอบ หรือสารที่ไม่ทราบลักษณะการเปลี่ยนสถานะ การทดสอบโดยใช้เครื่อง DSC จะสามารถให้ทั้งค่าเชิงปริมาณและคุณภาพ โดยผลการทดลองจะแสดงเปรียบเทียบเป็นชุดการทดลอง 3 ชุด เพื่อความเข้าใจง่ายในการวิเคราะห์ผล โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 สมบัติทางความร้อนของชุดที่ 1 (ตัวอย่างที่ 1 ถึง 4)

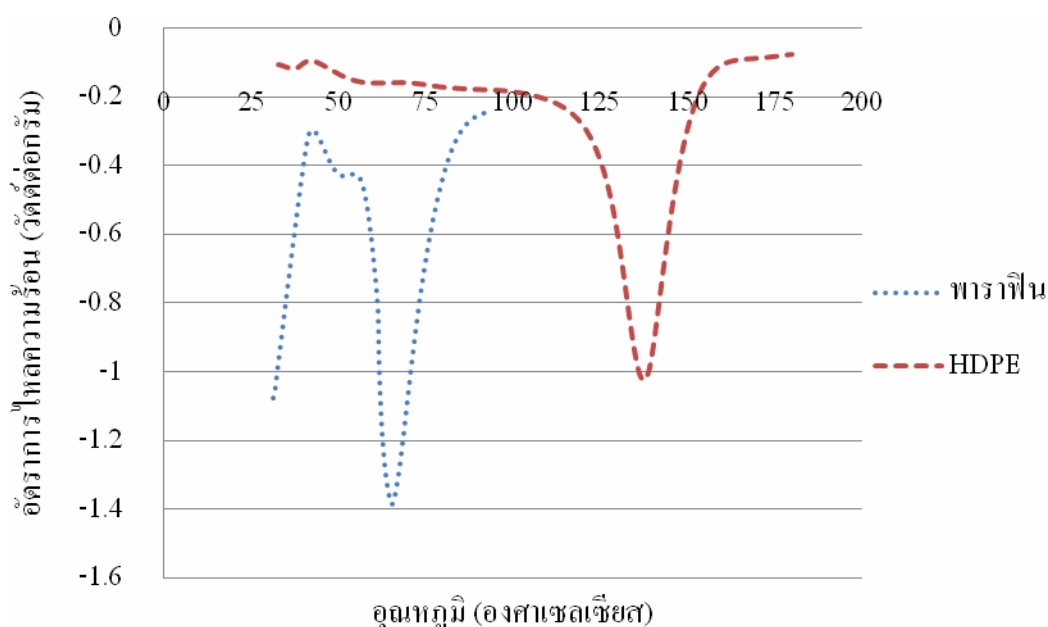
shape stabilized PCM ชุดที่ 1 หรือตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 ประกอบด้วย จี๊สพาราฟินและ HDPE ซึ่งจะทำให้การปรับเปลี่ยนสัดส่วนปริมาณ Paraffin : HDPE ซึ่งจี๊สพาราฟินจะกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพอลิเมอร์ (matrix) ของ HDPE โดยผลการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะ Heat capacity (C_p) จุดหลอมเหลวและค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลวหรือ Latent heat of fusion (λ) ของสารตั้งต้น ซึ่งได้แก่จี๊สพาราฟินและ HDPE โดยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ยี่ห้อ TA INSTRUMENT รุ่น SDT 2860 แสดงดังตารางที่ 12 และภาพที่ 49

ตารางที่ 12 คุณสมบัติทางความร้อนของพาราฟินและ HDPE

ตัวอย่าง	ความจุความร้อนของแข็ง (จุดต่อกรัม องศาเซลเซียส)	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	ความร้อนแฝง (จุดต่อกรัม)	ความจุความร้อนของเหลว (จุดต่อกรัม องศาเซลเซียส)
พาราฟิน	4.530	64.74	173.50	2.967
HDPE	1.198	137.48	-	0.920

- หมายเหตุ
1. ใช้อัตราการเพิ่มความร้อน (heating rate) ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
 2. ค่าความจุความร้อนเป็นค่าโดยประมาณเนื่องจากกราฟ DSC ที่ได้ไม่แสดง base line อย่างชัดเจน
 3. ค่าความจุความร้อนของแข็งจี๊สพาราฟินและ HDPE เป็นค่าเฉลี่ยในช่วงอุณหภูมิ 38-42 องศาเซลเซียส
 4. ค่าความร้อนแฝงของจี๊สพาราฟินอยู่ในช่วงประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส

5. ค่าความร้อนของเหลวขี้ผึ้งพาราฟินและ HDPE เป็นค่าเฉลี่ยในช่วงอุณหภูมิ 90-94 องศาเซลเซียส และ 176-180 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



ภาพที่ 49 กราฟ DSC ของพาราฟินและ HDPE

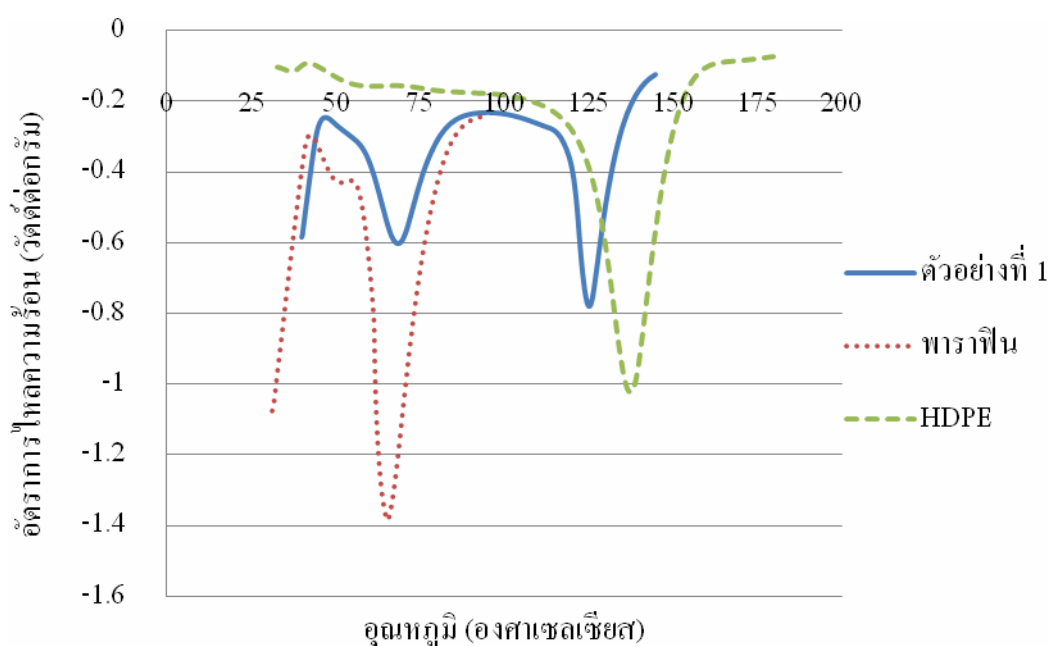
จากตารางที่ 12 และภาพที่ 49 แสดงให้เห็นว่าขี้ผึ้งพาราฟินและ HDPE มีช่วงการหลอมเหลวแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยขี้ผึ้งพาราฟินและ HDPE มีจุดหลอมเหลว 64.74 และ 137.48 องศาเซลเซียสตามลำดับ สำหรับค่าความร้อนแฝงขี้ผึ้งพาราฟินมีค่า 173.5 จูลต่อกรัม ช่วงของการหลอมเหลวที่ค่อนข้างกว้างและกราฟไม่แสดง base line อย่างชัดเจนนั้นมีสาเหตุเนื่องมาจากการใช้ heating rate ในการทดลอง 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งประสิทธิภาพของเครื่อง DSC ที่ใช้นั้นเหมาะสมกับ heating rate เพียง 1 องศาเซลเซียสต่อนาทีเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามกราฟที่ได้มานั้นก็สามารถนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบแต่ละตัวอย่างได้ดีพอควร

สำหรับการทดลองชุดที่ 1 เป็นการปรับเปลี่ยนปริมาณของขี้ผึ้งพาราฟินและ HDPE โดยจะศึกษาถึงลักษณะการหลอมละลายของสารตัวอย่าง จุดหลอมเหลวและปริมาณของความร้อนแฝงเป็นหลัก ซึ่งส่วนประกอบของสารตัวอย่าง ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของแต่ละตัวอย่างและกราฟ DSC ของแต่ละตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 13 และภาพที่ 50-54 ตามลำดับ

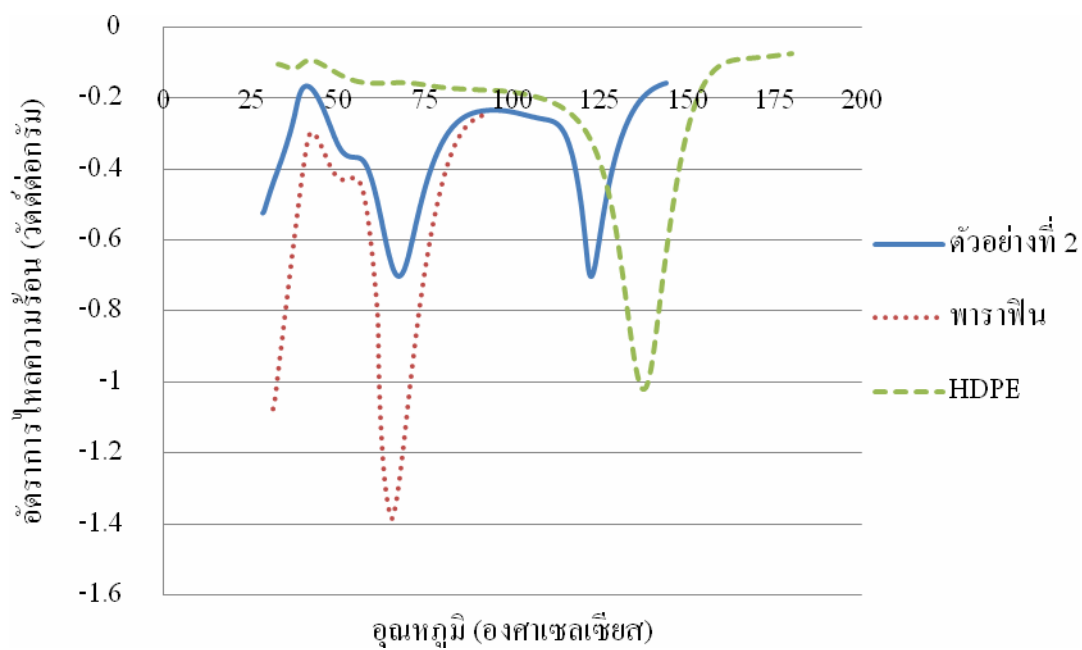
ตารางที่ 13 ปริมาณสัดส่วนพาราฟินและ HDPE และคุณสมบัติทางความร้อนการทดลองชุดที่ 1

ตัวอย่าง	พาราฟิน	HDPE	จุดหลอมเหลว พาราฟิน (องศาเซลเซียส)	จุดหลอมเหลว HDPE (องศาเซลเซียส)	ความร้อนแฝง (จูลต่อกรัม)
1	50	50	68.45	125.05	70.95
2	60	40	67.48	122.70	118.60
3	70	30	68.99	122.20	125.60
4	75	25	67.67	120.81	131.80

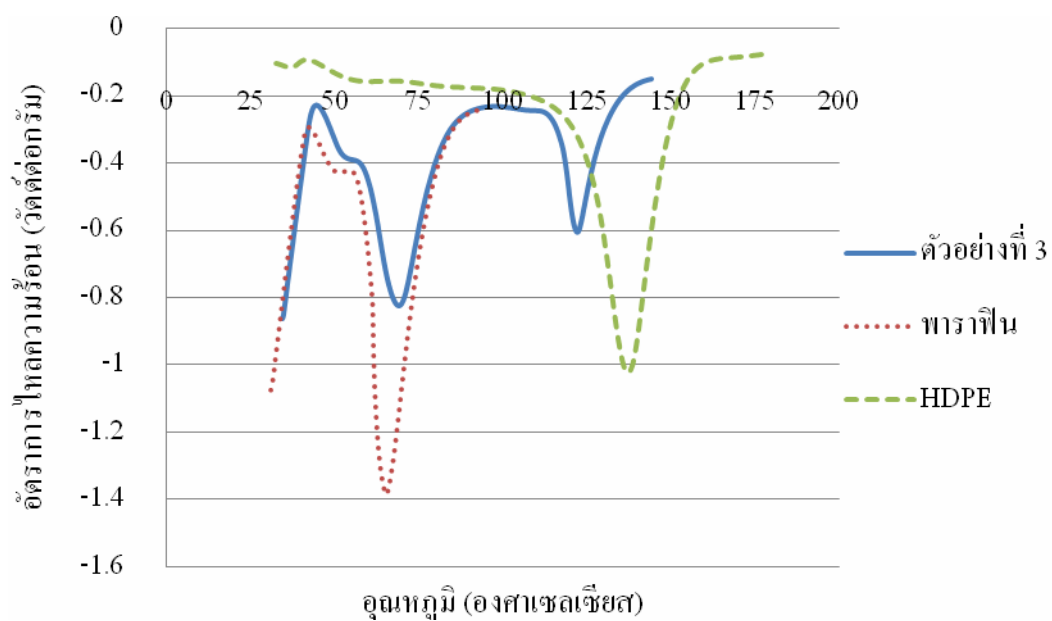
- หมายเหตุ 1. ใช้อัตราการเพิ่มความร้อน (heating rate) ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
 2. ค่าความร้อนแฝงเป็นของจีฟี่พาราฟินในสารตัวอย่าง
 3. ค่าความร้อนแฝงอยู่ในช่วงประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส



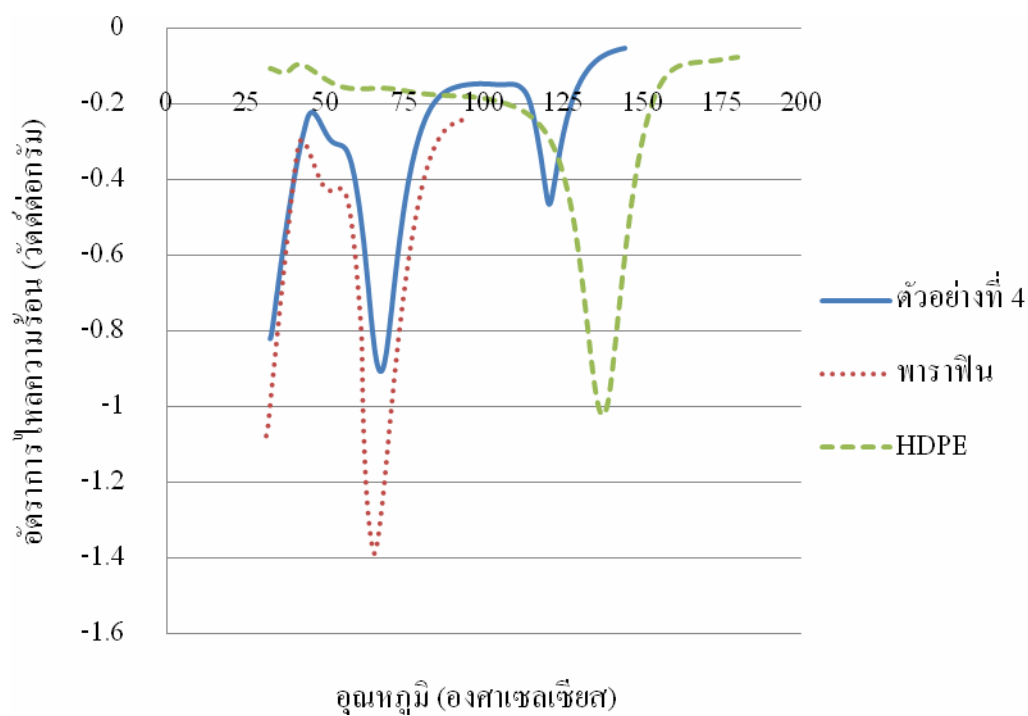
ภาพที่ 50 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 1



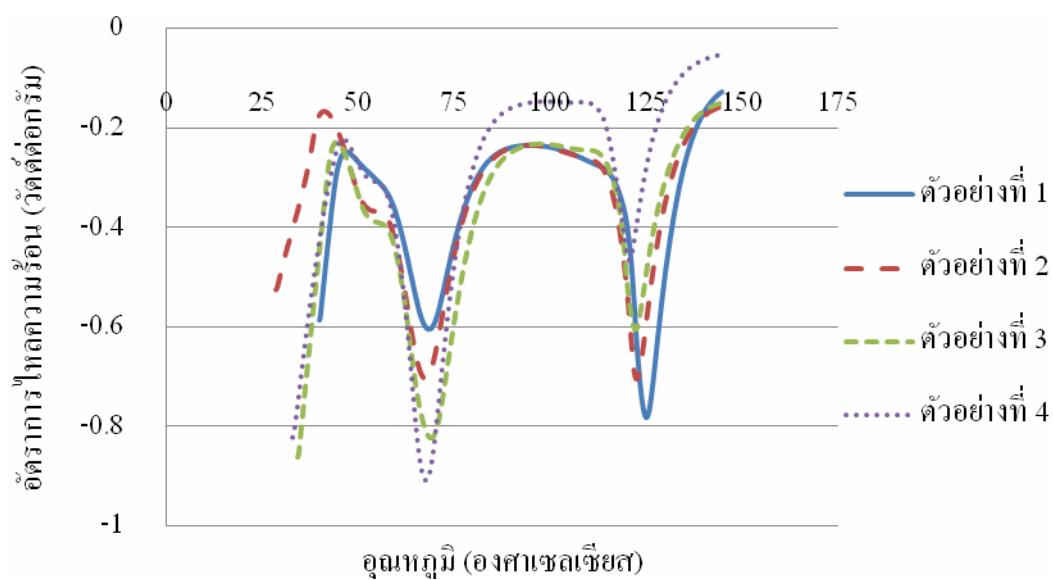
ภาพที่ 51 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 2



ภาพที่ 52 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 3



ภาพที่ 53 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 4



ภาพที่ 54 กราฟ DSC ของตัวอย่างชุดที่ 1

จากตารางที่ 13 และภาพที่ 50 ถึง 53 จะเห็นว่าตัวอย่างทั้ง 4 นั้นมีการหลอมละลายสองช่วง ซึ่งดูจากพีก (peak) ของกราฟ ในช่วงแรกจะมีการหลอมละลายในช่วงอุณหภูมิประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส โดยจะเป็นการหลอมละลายของจีฟี่งพาราฟินในสารตัวอย่างและในช่วงที่สองนั้นมีการหลอมละลายในช่วง 110-150 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นการหลอมละลายของ HDPE ในสารตัวอย่าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างสารทั้งสองไม่มีสารใหม่เกิดขึ้น แต่เป็นสารประกอบที่มาจากสารตั้งต้นทั้งสอง

และสามารถสังเกตได้ว่าจุดหลอมเหลวของจีฟี่งพาราฟินในสารตัวอย่างทั้ง 4 นั้นจะค่อนข้างใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของจีฟี่งพาราฟิน โดยมีการคลาดเคลื่อนประมาณ 3-4 องศาเซลเซียสเท่านั้น แต่สำหรับจุดหลอมเหลวของ HDPE ในสารตัวอย่างนั้นจะมีความแตกต่างกับ HDPE ซึ่งจะมีค่าจุดหลอมเหลวลดลงตามปริมาณของจีฟี่งพาราฟินในสารตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์จะมีผลต่อช่วงการหลอมเหลวและจุดหลอมเหลวของจีฟี่งพาราฟินเพียงเล็กน้อย แต่การเพิ่มปริมาณจีฟี่งพาราฟินมีผลต่อช่วงการหลอมเหลวและจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์เนื่องจาก ณ จุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ในสารตัวอย่างนั้นจีฟี่งพาราฟินได้หลอมละลายจนเป็นของเหลวสมบูรณ์แล้ว โดยจีฟี่งพาราฟินเหลวนี้จะกระจายอยู่ในโครงสร้างพอลิเมอร์ของ HDPE และทำให้แรงระหว่างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์นั้นลดลง ซึ่งเป็นเหตุให้จุดหลอมเหลวของ HDPE ลดลงตามไปด้วย และลดลงตามปริมาณของจีฟี่งพาราฟินเหลวที่เพิ่มขึ้นด้วย

จากภาพที่ 54 เมื่อพิจารณาจากพีกของกราฟของแต่ละตัวอย่างนั้นจะเห็นว่าพีกการหลอมละลายของจีฟี่งพาราฟินจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของจีฟี่งพาราฟินในสารตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่ 1 ซึ่งมีปริมาณจีฟี่งพาราฟินในสารตัวอย่างน้อยที่สุดจะมีพีกการหลอมละลายของจีฟี่งพาราฟินในสารตัวอย่างน้อยที่สุด ดังภาพที่ 50 และตัวอย่างที่ 4 ซึ่งมีปริมาณจีฟี่งพาราฟินในสารตัวอย่างมากที่สุดจะมีพีกการหลอมละลายของจีฟี่งพาราฟินในสารตัวอย่างมากที่สุด ดังภาพที่ 53 สำหรับพีกการหลอมละลายของ HDPE ก็ลดลงตามปริมาณ HDPE ในสารตัวอย่างเช่นเดียวกัน ซึ่งพีกที่สำคัญคือพีกการหลอมละลายของจีฟี่งพาราฟิน เนื่องจากเราจะใช้ประโยชน์ของความร้อนแฝงในช่วงการละลายของจีฟี่งพาราฟินเท่านั้น โดยค่าความร้อนแฝงของจีฟี่งพาราฟินในสารตัวอย่างนั้นจะเพิ่มขึ้นโดยเกือบจะเป็นสัดส่วนตามปริมาณของปริมาณจีฟี่งพาราฟินในสารตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 14 และ 15 ช่วงอุณหภูมิการใช้งาน shape stabilized PCM ของตัวอย่างชุดที่ 1 สามารถใช้ได้ไม่เกินช่วงอุณหภูมิ 100-110 องศาเซลเซียส เนื่องจากหากเกินช่วงอุณหภูมินี้พอลิเมอร์จะหลอมละลาย

ตารางที่ 14 ปริมาณความร้อนแฝง ความร้อนแฝงตามสัดส่วน และค่าคลาดเคลื่อนของพาราฟินในสารตัวอย่างของตัวอย่างชุดที่ 1

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์พาราฟิน (%)	ความร้อนแฝง (จูลต่อกรัม)	ความร้อนแฝงตามสัดส่วน (จูลต่อกรัม)	ค่าคลาดเคลื่อน (%)
1	50	70.95	86.75	18.21
2	60	118.60	104.10	13.93
3	70	125.60	121.45	3.42
4	75	131.80	130.13	1.28
พาราฟิน	100	173.50	173.50	0

หมายเหตุ 1. ใช้อัตราการเพิ่มความร้อน (heating rate) ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
 2. จุดหลอมเหลวและค่าความร้อนแฝงเป็นของจีฟิ่งพาราฟินในสารตัวอย่าง
 3. ค่าความร้อนแฝงอยู่ในช่วงประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 15 ปริมาณเปอร์เซ็นต์ความร้อนแฝงของพาราฟินในสารตัวอย่างเทียบกับพาราฟินเปล่าของตัวอย่างชุดที่ 1

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์พาราฟิน (%)	ความร้อนแฝง (จูลต่อกรัม)	<u>ความร้อนแฝงพาราฟินในสารตัวอย่าง</u> <u>ความร้อนแฝงพาราฟินเปล่า</u>
1	50	70.95	40.89%
2	60	118.60	68.35%
3	70	125.60	72.39%
4	75	131.80	75.96%
พาราฟิน	100	173.50	100%

หมายเหตุ 1. ใช้อัตราการเพิ่มความร้อน (heating rate) ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
 2. ค่าความร้อนแฝงเป็นของจีฟิ่งพาราฟินในสารตัวอย่าง
 3. ค่าความร้อนแฝงอยู่ในช่วงประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส

2.2 สมบัติทางความร้อนของชุดที่ 2 (ตัวอย่างที่ 5 ถึง 9)

shape stabilized PCM ชุดที่ 2 หรือตัวอย่างที่ 5 ถึง 9 ประกอบด้วย จี๊ฟี่งพาราฟิน LDPE และ EVA ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนปริมาณ Paraffin : LDPE : EVA โดยมีปริมาณของจี๊ฟี่งพาราฟินคงที่ ซึ่งจี๊ฟี่งพาราฟินจะกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพอลิเมอร์ของ LDPE และ EVA

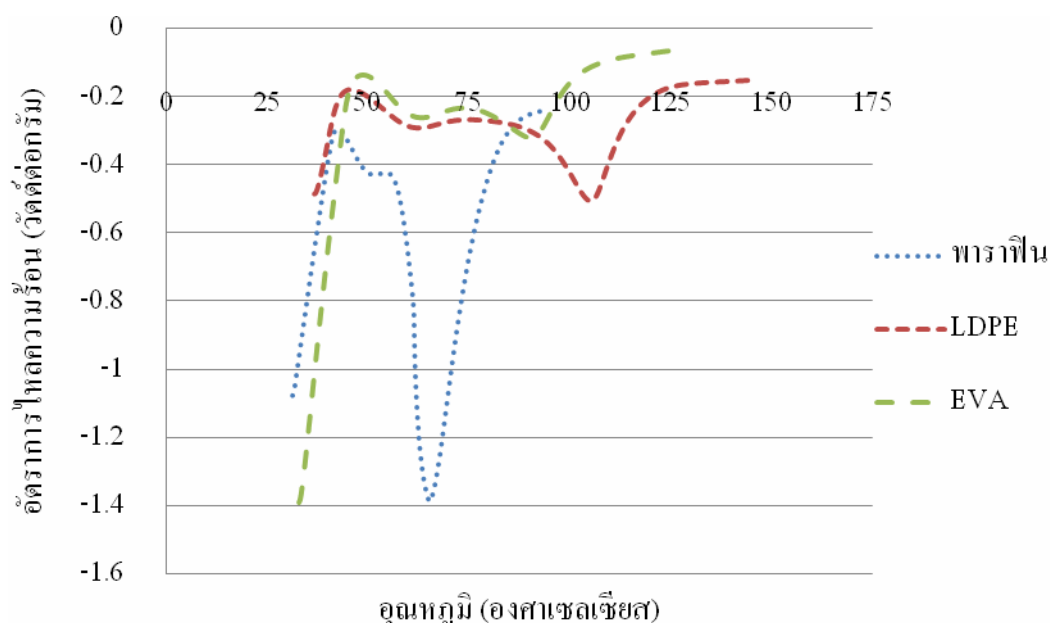
เนื่องจากความเหมือนกันในโมเลกุลของจี๊ฟี่งพาราฟิน LDPE และ EVA วัสดุเหล่านี้สามารถ ละลายและผสมกันอย่างง่ายดาย ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนที่ใช้ในการผสมของจี๊ฟี่งพาราฟินและพอลิเมอร์ ซึ่งจี๊ฟี่งพาราฟินจะสร้างเฟสการกระจายตัว (dispersed phase) ในโครงสร้างพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์จะ สร้างเฟสการกระจายตัวในโครงสร้างของจี๊ฟี่งพาราฟิน เพื่อที่จะได้วัสดุที่มีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่ดีจี๊ฟี่งพาราฟินควรจะสร้างเฟสของการกระจายตัว สาเหตุที่ใช้โคพอลิเมอร์ในงานวิจัยนี้เนื่องจากกลุ่มของ vinyl-acetate จะทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ยาวและทำให้สร้างโครงสร้างที่เหมาะสมกับจี๊ฟี่งพาราฟินที่มีสายโซ่สั้น โดยผลการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะ Heat capacity (C_p) จุดหลอมเหลวและค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลวหรือ Latent heat of fusion (λ) ของสารตั้งต้น ซึ่งได้แก่จี๊ฟี่งพาราฟิน LDPE และ EVA โดยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) แสดงดังตารางที่ 16 และภาพที่ 55

ตารางที่ 16 คุณสมบัติทางความร้อนของพาราฟิน LDPE และ EVA

ตัวอย่าง	ความจุความร้อนของแข็ง (จุดต่อกรัม องศาเซลเซียส)	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	ความร้อนแฝง (จุดต่อกรัม)	ความจุความร้อนของเหลว (จุดต่อกรัม องศาเซลเซียส)
พาราฟิน	4.531	64.74	173.50	2.967
LDPE	2.188	105.19	-	1.866
EVA	1.856	90.29	-	0.921

- หมายเหตุ 1. ใช้อัตราการเพิ่มความร้อน (heating rate) ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
2. ค่าความจุความร้อนเป็นค่าโดยประมาณเนื่องจากกราฟ DSC ที่ได้ไม่แสดง base line อย่างชัดเจน
3. ค่าความจุความร้อนของแข็งจี๊ฟี่งพาราฟิน LDPE และ EVA เป็นค่าเฉลี่ยในช่วงอุณหภูมิ 38-42 องศาเซลเซียส 45-50 องศาเซลเซียส และ 45-50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
4. ค่าความร้อนแฝงของจี๊ฟี่งพาราฟินอยู่ในช่วงประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส

5. ค่าความจุความร้อนของเหลวขี้ผึ้งพาราฟิน LDPE และ EVA เป็นค่าเฉลี่ยในช่วงอุณหภูมิ 90-94 องศาเซลเซียส 135-140 องศาเซลเซียสและ 115-120 องศาเซลเซียสตามลำดับ



ภาพที่ 55 กราฟ DSC ของพาราฟิน LDPE และ EVA

จากตารางที่ 16 และภาพที่ 55 แสดงให้เห็นว่าขี้ผึ้งพาราฟินและ LDPE และ EVA มีช่วงการหลอมเหลวแตกต่างกัน โดยขี้ผึ้งพาราฟิน LDPE และ EVA มีจุดหลอมเหลว 64.74 105.19 และ 90.29 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สำหรับค่าความร้อนแฝงขี้ผึ้งพาราฟิน 173.5 จูลต่อกรัม ช่วงของการหลอมเหลวที่ค่อนข้างกว้างและกราฟไม่แสดง base line อย่างชัดเจนนั้นมีสาเหตุเนื่องมาจากการใช้ heating rate ในการทดลอง 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมา

สำหรับการทดลองชุดที่ 2 เป็นการปรับเปลี่ยนปริมาณของขี้ผึ้งพาราฟิน LDPE และ EVA โดยจะศึกษาถึงลักษณะการหลอมละลายของสารตัวอย่าง จุดหลอมเหลวและปริมาณของความร้อนแฝงเป็นหลัก ซึ่งส่วนประกอบของสารตัวอย่าง ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของแต่ละตัวอย่างและกราฟ DSC ของแต่ละตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 17 และภาพที่ 56-60 ตามลำดับ

ตารางที่ 17 ปริมาณสัดส่วนพาราฟิน LDPE และ EVA และคุณสมบัติทางความร้อนของการทดลองชุดที่ 2

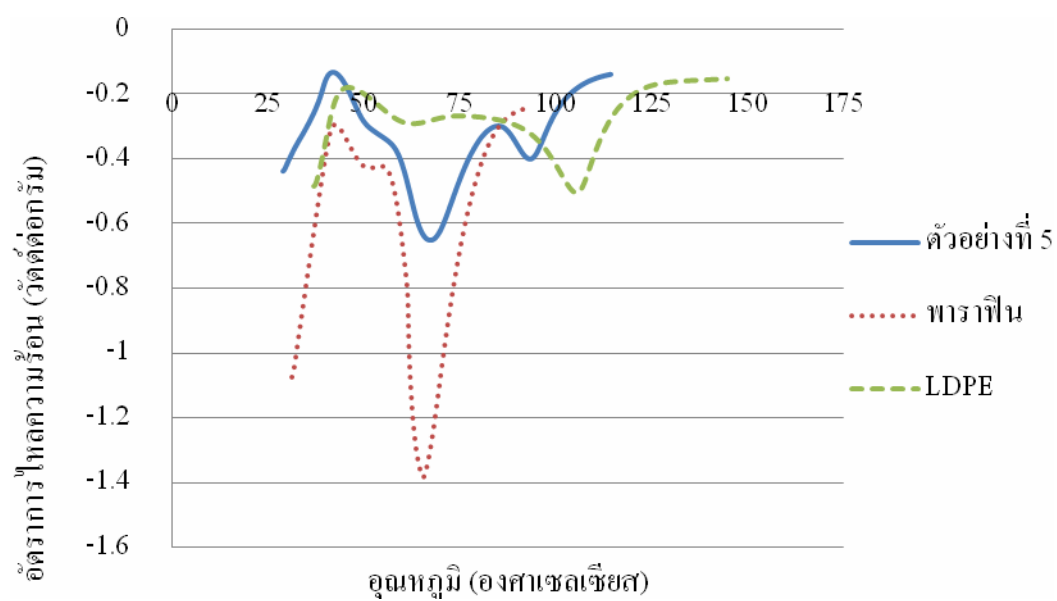
ตัวอย่าง	พาราฟิน	LDPE	EVA	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	ความร้อนแฝง (จูลต่อกรัม)
5	55	45	0	66.73	95.46
6	55	30	15	67.68	104.10
7	55	22.5	22.5	66.41	110.30
8	55	15	30	68.02	98.63
9	55	0	45	66.72	-

หมายเหตุ 1. ใช้อัตราการเพิ่มความร้อน (heating rate) ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

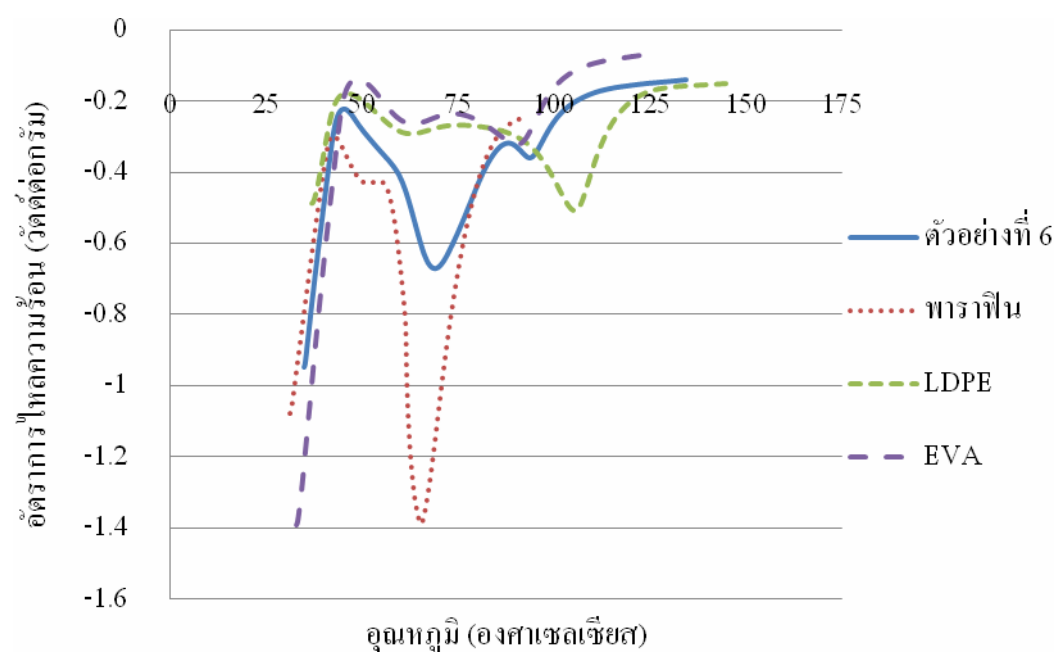
2. จุดหลอมเหลวและค่าความร้อนแฝงโดยประมาณเป็นของจีพีพาราฟินในสารตัวอย่าง

3. ค่าความร้อนแฝงอยู่ในช่วงประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น เนื่องจากกราฟ DSC มีการทับซ้อนของกราฟ (overlap) โดยค่าความร้อนแฝงของจีพีพาราฟินที่ได้จะมีค่าความจุความร้อนของแข็งของพอลิเมอร์รวมอยู่ด้วย จึงทำให้หาค่าความร้อนแฝงของจีพีพาราฟินเปล่าไม่ได้

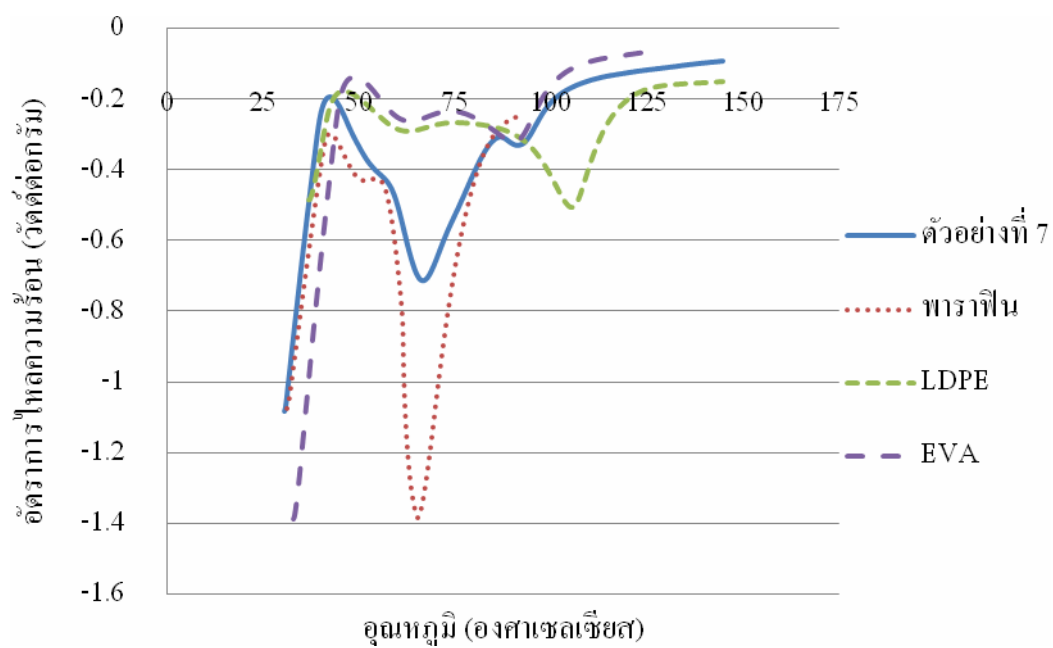
4. ตัวอย่างที่ 9 ไม่สามารถหาค่าความร้อนแฝงได้ เนื่องจากกราฟ DSC มีการ overlap มากเกินไป



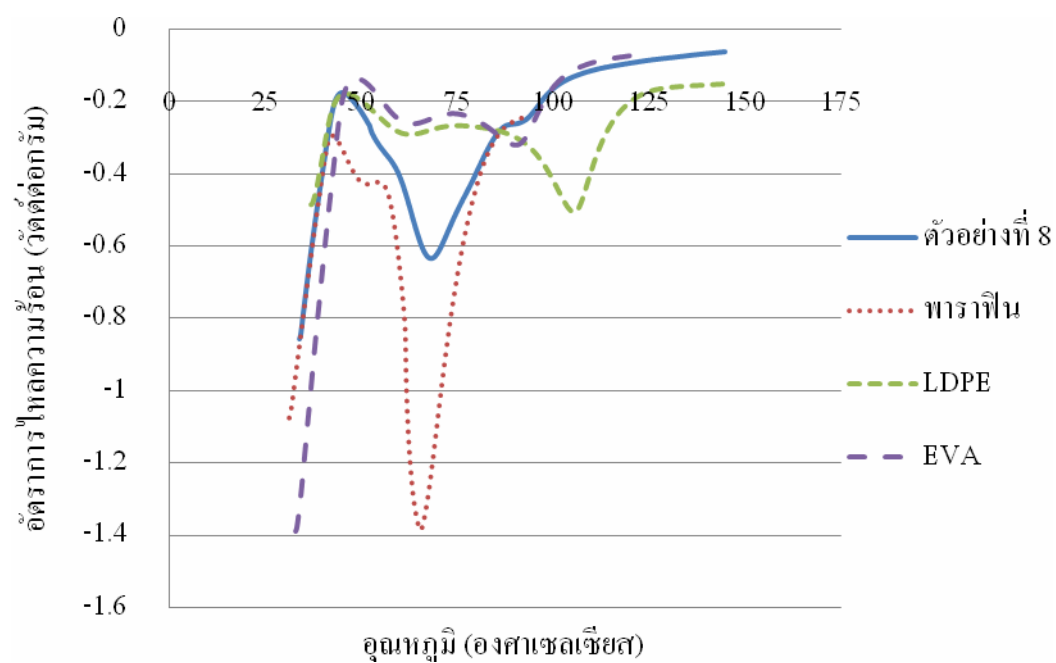
ภาพที่ 56 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 5



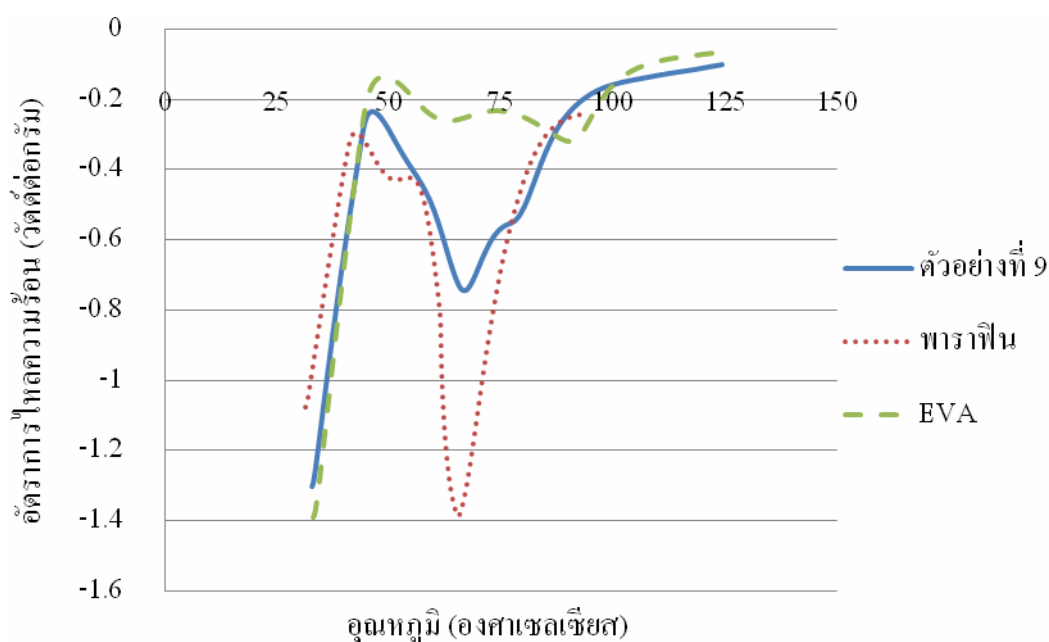
ภาพที่ 57 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 6



ภาพที่ 58 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 7



ภาพที่ 59 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 8



ภาพที่ 60 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 9

จากตารางที่ 17 จะเห็นว่าอุณหภูมิหลอมละลายของจีฟี่งพาราฟินในสารตัวอย่างนั้น ก่อนข้างคงที่ แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิเมอร์ LDPE และ EVA ไม่ส่งผลกระทบต่อจุดหลอมเหลวของจีฟี่งพาราฟินภายในสารตัวอย่างมากนัก และเมื่อพิจารณาค่าความร้อนแฝงจะเห็นว่าแต่ละตัวอย่างค่อนข้างแตกต่างกันในขณะที่มีปริมาณจีฟี่งพาราฟินในสารตัวอย่างเท่ากันคือ 55% หากคิดค่าความร้อนแฝงตามปริมาณแล้วควรมีค่า 95.43 จูลต่อกรัม หรือ 173.5×0.55 นั่นเอง และสาเหตุที่มีค่าความร้อนแฝงไม่เท่ากันนั้น อาจเนื่องมาจากสัดส่วนของพอลิเมอร์ที่แตกต่างกันของแต่ละตัวอย่าง ทำให้เกิดการกระจายตัวของจีฟี่งพาราฟินในโครงสร้างพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลถึงค่าความร้อนแฝงของจีฟี่งพาราฟินด้วย ดังแสดงในตารางที่ 18

จากกราฟ DSC ที่ได้แสดงให้เห็นว่าไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างสารทั้งสาม ไม่มีสารใหม่เกิดขึ้น แต่สารที่ได้เป็นสารประกอบที่มาจากสารตั้งต้นทั้งสาม โดยคุณสมบัติด้านความร้อนจะเป็นการรวมคุณสมบัติของจีฟี่งพาราฟินและพอลิเมอร์ที่เป็นส่วนผสม และภาพที่ 56 แสดงถึงตัวอย่างที่ 5 ซึ่งมีเพียงจีฟี่งพาราฟินและ LDPE กราฟ DSC ที่ได้จะมีการหลอมละลายสองช่วงหรือกราฟมีสองฟีก โดยในช่วงแรกเป็นการละลายของจีฟี่งพาราฟินและช่วงที่สองเป็นการละลายของ LDPE และสังเกตได้ว่า LDPE ไม่ส่งผลกระทบต่อฟีกของจีฟี่งพาราฟินมากนัก แต่จีฟี่งพาราฟินมีผลต่อช่วงการ

หลอมเหลวและจุดหลอมเหลวของ LDPE เนื่องจาก ณ จุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ในสารตัวอย่าง นั้นจีฟี่พาราฟินได้หลอมละลายจนเป็นของเหลวสมบูรณ์แล้ว โดยจีฟี่พาราฟินเหลวนี้อาจจะกระจาย อยู่ในโครงสร้างพอลิเมอร์ของ LDPE ทำให้แรงระหว่างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์นั้นลดลง ซึ่งเป็นเหตุให้จุดหลอมเหลวของ LDPE ลดลงตามไปด้วย และยังสังเกตได้ว่าทั้งสองฟิคนั้นมีการ overlap กันอยู่ จึงทำให้ค่าความร้อนแฝงของจีฟี่พาราฟินในสารตัวอย่างนั้นมีการรวมค่าความร้อนของ LDPE เข้าไปด้วย และหากนำไปประยุกต์ใช้งานนั้น ควรใช้งาน shape stabilized PCM ในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 85-90 องศาเซลเซียส เพราะหากเกินอุณหภูมินี้แล้ว พอลิเมอร์จะหลอมละลาย

ภาพที่ 57 ถึง 59 แสดงถึงตัวอย่างที่ 6 ถึง 8 ซึ่งมีการลดปริมาณของ LDPE และเพิ่มปริมาณของ EVA ในสารตัวอย่าง และจะเห็นว่าฟิการหลอมละลายของจีฟี่พาราฟินค่อนข้างเท่ากัน แต่จะแตกต่างกันที่ฟิการของพอลิเมอร์ เนื่องจากการลดปริมาณ LDPE และเพิ่มปริมาณ EVA ไม่ส่งผลต่อช่วงการหลอมละลาย และจุดหลอมเหลวของจีฟี่พาราฟิน แต่จีฟี่พาราฟินมีผลต่อฟิการของพอลิเมอร์ดังที่ได้กล่าวมา โดยฟิการละลายของพอลิเมอร์จะเข้าใกล้ EVA เมื่อยิ่งเพิ่มปริมาณของ EVA เข้าไป และกราฟจะมีการ overlap มากขึ้น และอุณหภูมิใช้งาน shape stabilized PCM ไม่ควรเกินช่วง 80-85 และในกรณีตัวอย่างที่ 9 หรือภาพที่ 60 นั้นแสดงให้เห็นถึงฟิการหลอมละลายที่เกือบจะรวมเป็นฟิการเดียวของจีฟี่พาราฟินและ EVA เนื่องจากสารทั้งสองมีจุดหลอมเหลวที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งกราฟที่มีลักษณะการ overlap มากเช่นนี้จะไม่สามารถหาค่าความร้อนแฝงได้ชัดเจน และการนำไปใช้งานของ shape stabilized PCM ตัวอย่างนี้ไม่ควรเกินช่วงอุณหภูมิ 70-75 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 18 ปริมาณเปอร์เซ็นต์ความร้อนแฝงของพาราฟินในสารตัวอย่างเทียบกับพาราฟิน
เปล่าของตัวอย่างชุดที่ 2

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์พาราฟิน (%)	ความร้อนแฝง (จูลต่อกรัม)	<u>ความร้อนแฝงพาราฟินในสารตัวอย่าง</u> <u>ความร้อนแฝงพาราฟินเปล่า</u>
5	55	95.46	55 %
6	55	104.10	60 %
7	55	110.30	63.5 %
8	55	98.63	56.8 %
9	55	-	-

พาราฟิน	100	173.50	100 %
---------	-----	--------	-------

- หมายเหตุ 1. ใช้อัตราการเพิ่มความร้อน (heating rate) ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
 2. ค่าความร้อนแฝงเป็นค่าโดยประมาณของซีฟี่พาราฟินในสารตัวอย่าง
 3. ค่าความร้อนแฝงอยู่ในช่วงประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส

2.3 สมบัติทางความร้อนของชุดที่ 3 (ตัวอย่างที่ 10 ถึง 13)

shape stabilized PCM ชุดที่ 3 หรือตัวอย่างที่ 10 ถึง 13 ประกอบด้วย ซีฟี่พาราฟิน LDPE EVA และผงกราไฟท์ ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนปริมาณ Paraffin : LDPE : EVA : Graphite โดยมีปริมาณของซีฟี่พาราฟินคงที่ ซึ่งซีฟี่พาราฟินจะกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพอลิเมอร์ของ LDPE กับ EVA และมีปริมาณผงกราไฟท์ เนื่องจาก shape stabilized PCM นั้นมีค่าความนำความร้อนที่ต่ำมาก โดยส่วนประกอบหลักซึ่งคือซีฟี่พาราฟินมีค่าความนำความร้อนต่ำเพียง 0.24 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (Chromalox, 2002) โดยเพื่อประ สิทธิภาพของ shape stabilized PCM ในการดูดความร้อนและคายความร้อนได้อย่างรวดเร็ว จึงควรมีค่าความนำความร้อนสูง และหนึ่งในวิธีผลิตก็คือ การผสมผงกราไฟท์เข้าไปเป็นส่วนประกอบของ shape stabilized PCM

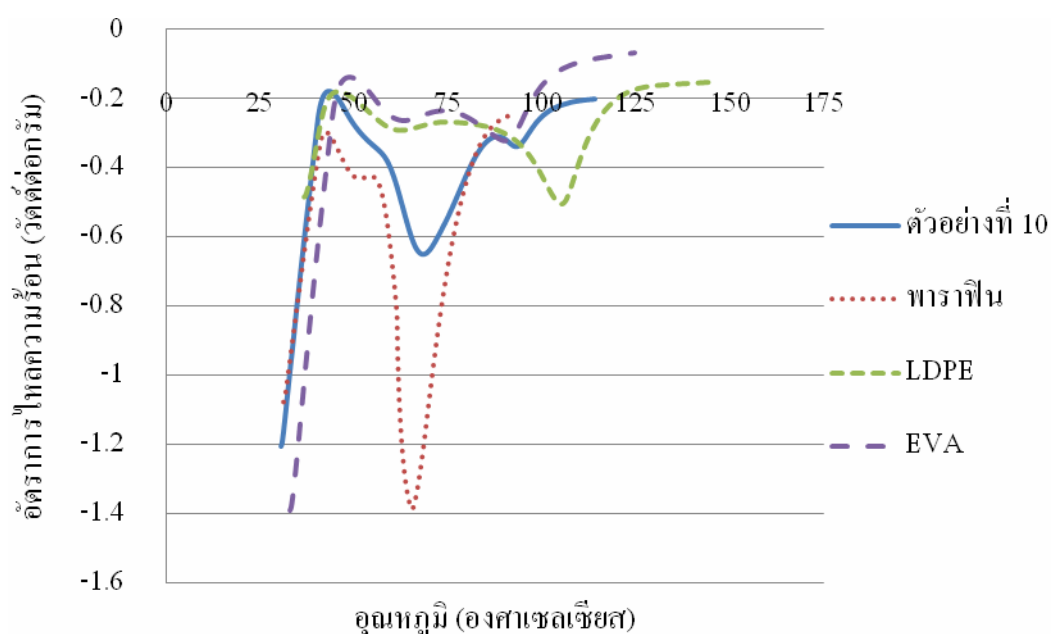
โดยการทดลองในชุดนี้จะเป็นการปรับเปลี่ยนค่าสัดส่วนของผงกราไฟท์ในผลิตภัณฑ์และมุ่งเป้าหมายที่ค่าความนำความร้อนที่เปลี่ยนไปตามปริมาณผงกราไฟท์เป็นหลัก ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 8 และ 9 และสำหรับส่วนประกอบของสารตัวอย่าง ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของแต่ละตัวอย่างและกราฟ DSC ของแต่ละตัวอย่างในชุดนี้ แสดงดังตารางที่ 19 และภาพที่ 61-64 ตามลำดับ

ตารางที่ 19 ปริมาณสัดส่วนพาราฟิน LDPE EVA และผงกราไฟท์ และคุณสมบัติทางความร้อนของการทดลองชุดที่ 3

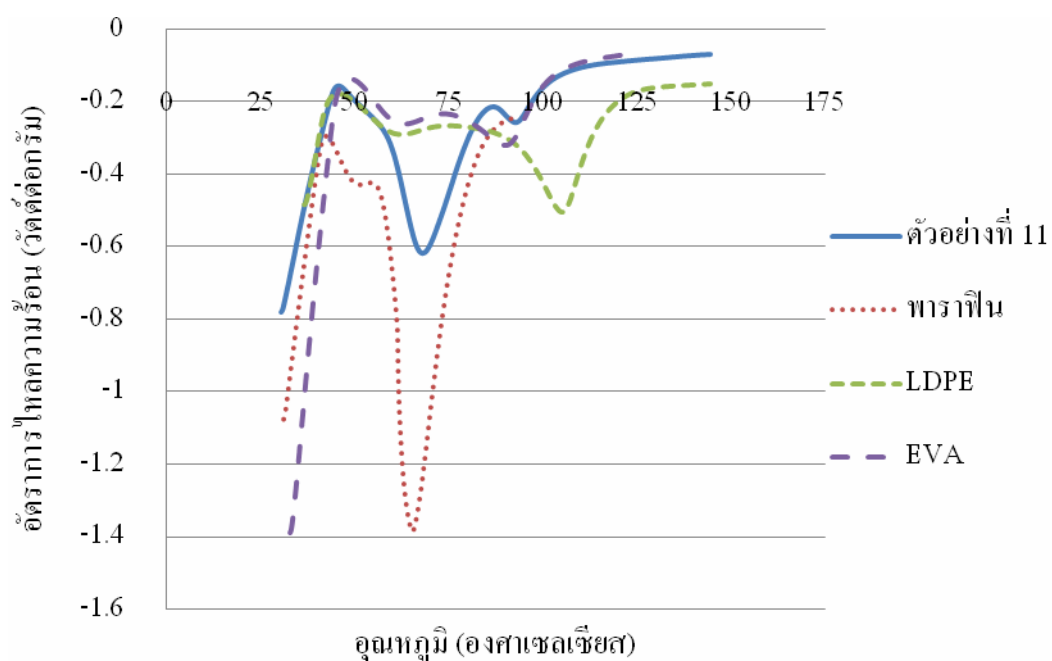
ตัวอย่าง	พาราฟิน	LDPE	EVA	ผงกราไฟท์	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	ความร้อนแฝง (จูลต่อกรัม)
10	55	27	13	5	68.13	94.54
11	55	25	10	10	66.63	102.50
12	55	20	10	15	66.72	100.70
13	55	15	10	20	67.18	108.40

- หมายเหตุ 1. ใช้อัตราการเพิ่มความร้อน (heating rate) ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

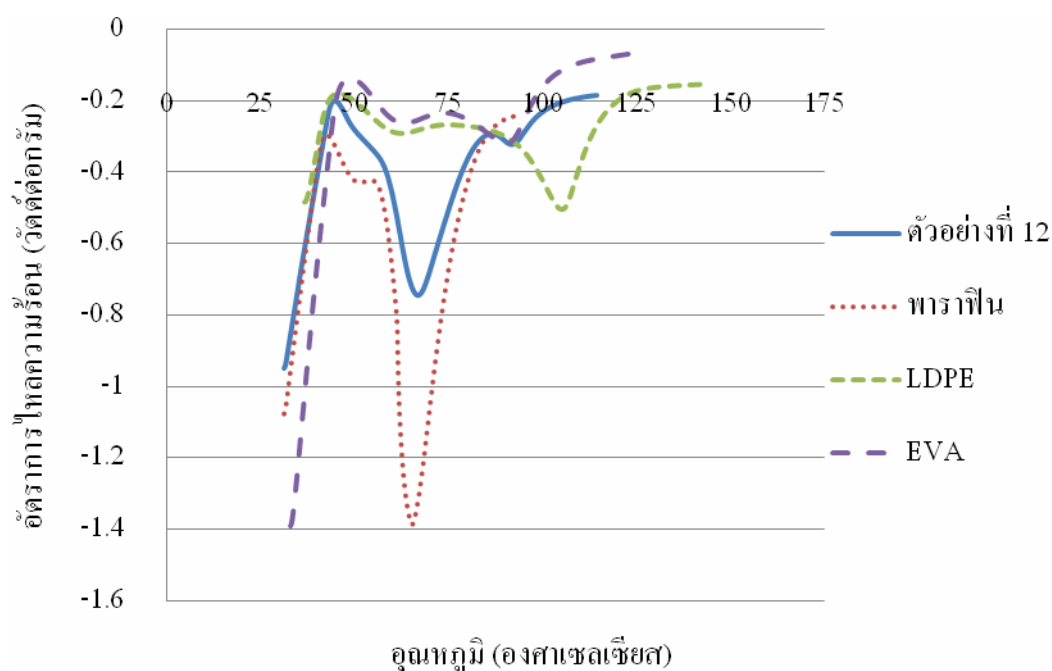
2. จุดหลอมเหลวและค่าความร้อนแฝงโดยประมาณเป็นของจีฟิ่งพาราฟินในสารตัวอย่าง
3. ค่าความร้อนแฝงอยู่ในช่วงประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น เนื่องจากกราฟ DSC มีการ overlap โดยค่าความร้อนแฝงของจีฟิ่งพาราฟินที่ได้จะมีค่าความจุความร้อนของแข็งของพอลิเมอร์รวมอยู่ด้วย จึงทำให้หาค่าความร้อนแฝงของจีฟิ่งพาราฟินเปล่าไม่ได้



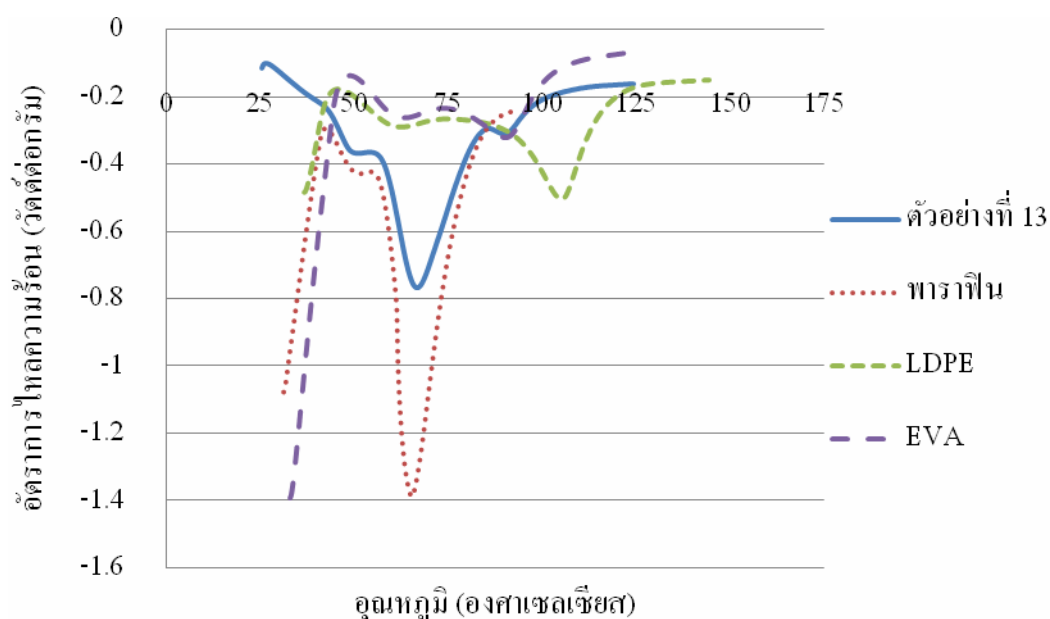
ภาพที่ 61 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 10



ภาพที่ 62 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 11



ภาพที่ 63 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 12



ภาพที่ 64 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 13

จากกราฟ DSC ที่ได้แสดงให้เห็นว่าไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างสารทั้งหมด ไม่มีสารใหม่เกิดขึ้น แต่สารที่ได้เป็นสารประกอบที่มาจากสารตั้งต้นทั้งหมด โดยคุณสมบัติด้านความร้อนจะเป็นการรวมคุณสมบัติของจีฟี่งพาราฟินและพอลิเมอร์ที่เป็นส่วนผสม

และจากตารางที่ 17 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณของผงกราฟไฟท์ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออุณหภูมิหลอมและความร้อนแฝงของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณของจีฟี่งพาราฟินในผลิตภัณฑ์เท่าใดนัก ซึ่งสามารถสังเกตได้จากภาพที่ 61 ถึง 64 โดยกราฟ DSC ทั้งหมดจะคล้ายกับตัวอย่างที่ 6 ดังภาพที่ 57 โดยกราฟจะมีสองพีค พีคแรกเป็นของจีฟี่งพาราฟินและพีคที่สองเป็นของพอลิเมอร์และทั้งสองพีคมีการ overlap กันอยู่ ส่วนอุณหภูมิใช้งานไม่ควรเกินช่วง 80-85 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาค่าความร้อนแฝงจะเห็นว่าแต่ละตัวอย่างแตกต่างกันในปริมาณไม่มาก เนื่องมาจากสัดส่วนของพอลิเมอร์ของแต่ละตัวอย่าง ทำให้เกิดการกระจายตัวของจีฟี่งพาราฟินในโครงสร้างพอลิเมอร์ที่ต่างกัน ซึ่งส่งผลถึงค่าความร้อนแฝงของจีฟี่งพาราฟินด้วย ดังแสดงในตารางที่ 20

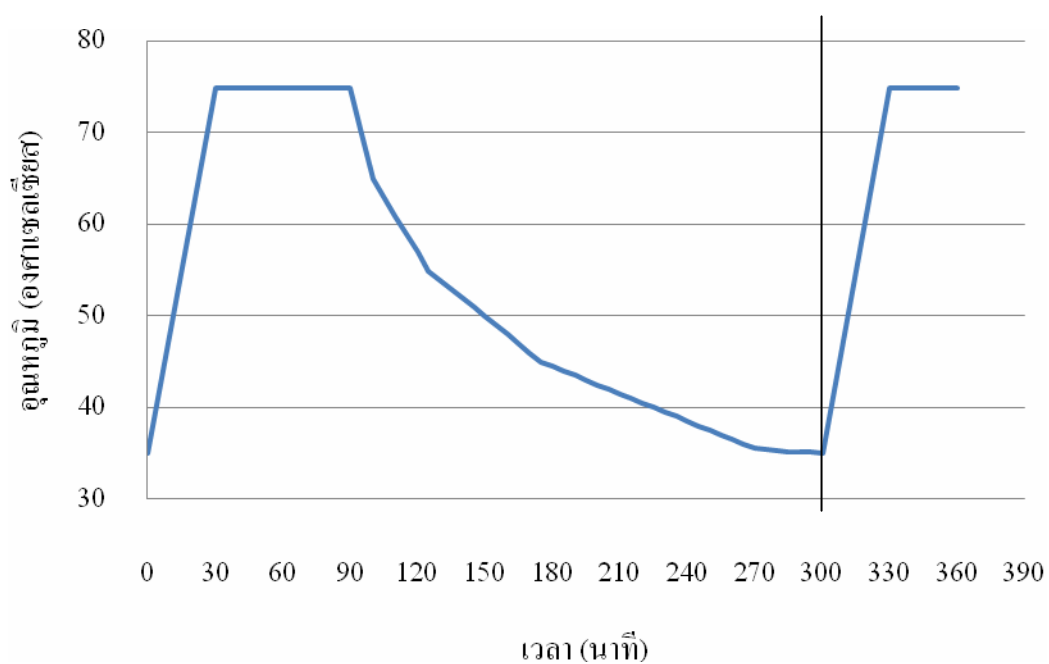
ตารางที่ 20 ปริมาณเปอร์เซ็นต์ความร้อนแฝงของพาราฟินในสารตัวอย่างเทียบกับพาราฟิน
เปล่าของตัวอย่างชุดที่ 3

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์พาราฟิน (%)	ความร้อนแฝง (จูลต่อกรัม)	<u>ค่าความร้อนแฝงพาราฟินในสารตัวอย่าง</u> <u>ความร้อนแฝงพาราฟินในค่า</u>
10	55	94.54	54.48 %
11	55	102.50	59.07 %
12	55	100.70	58.04 %
13	55	108.40	62.47 %
พาราฟิน	100	173.50	100 %

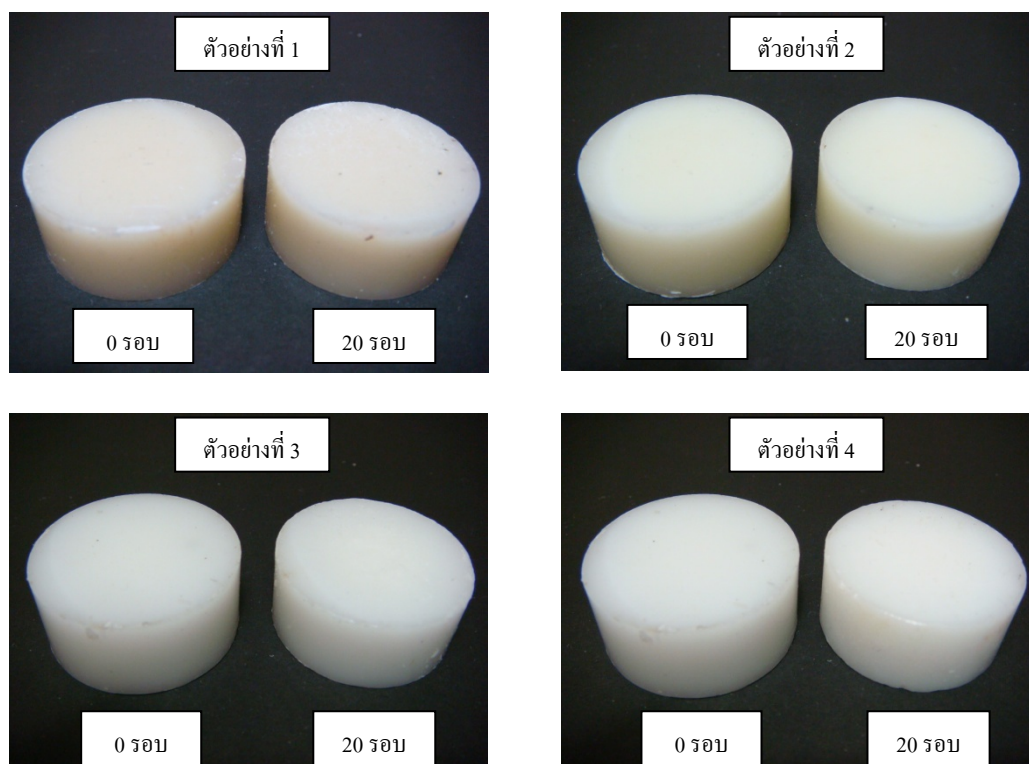
หมายเหตุ 1. ใช้อัตราการเพิ่มความร้อน (heating rate) ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
2. ค่าความร้อนแฝงเป็นโดยประมาณของขี้ผึ้งพาราฟินในสารตัวอย่าง
3. ค่าความร้อนแฝงอยู่ในช่วงประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส

3. การศึกษาความคงทนต่อรอบการใช้งาน

ผลิตภัณฑ์ shape stabilized PCM ทั้งหมดจะถูกบรรจุใส่ถุงพลาสติกทนความร้อนที่ถูกเจาะรู โดยจำนวนรูของแต่ละถุงเท่ากัน เพื่อให้ความร้อนสามารถสัมผัสโดยตรงกับผลิตภัณฑ์ จากนั้นจะนำผลิตภัณฑ์เข้าเครื่อง water bath ยี่ห้อ MEMMERT โดยอุณหภูมิในเครื่อง water bath เป็น 35 องศาเซลเซียส ในตอนเริ่มต้น จากนั้นปรับอุณหภูมิในเครื่อง water bath เป็น 75 องศาเซลเซียส โดยเครื่องจะใช้เวลาประมาณ 30 นาทีจึงเพิ่มอุณหภูมิถึง 75 องศาเซลเซียส จากนั้นแช่ตัวอย่างทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่ทำให้ขี้ผึ้งพาราฟินที่กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพอลิเมอร์ละลายได้สมบูรณ์ แล้วปรับอุณหภูมิลงมาเป็น 35 องศาเซลเซียส โดยเครื่องจะใช้เวลาประมาณ 3.5 ชั่วโมงอุณหภูมิจะลดลงถึง 35 องศาเซลเซียส จึงนับเป็น 1 รอบ ซึ่งอุณหภูมิในเครื่อง water bath ในรอบ 1 รอบ แสดงดังภาพที่ 34 ทำเช่นเดิมให้ครบ 20 รอบ โดยถ่ายภาพการเปลี่ยนแปลงก่อนกับหลัง 20 รอบ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับลักษณะของผลิตภัณฑ์ในด้านความคงทนต่อรอบการใช้งานที่เปลี่ยนไปในแต่ละตัวอย่าง ดังภาพที่ 65 ถึง 67



ภาพที่ 34 1 รอบการใช้งาน (1 cycle) ใช้เวลา 300 นาที



ภาพที่ 65 ผลิตกัณฑ์ shape stabilized PCM ตัวอย่างชุดที่ 1 ก่อนและหลังการใช้งาน 20 รอบ

จากภาพที่ 65 ซึ่งแสดงภาพก่อนและหลังการใช้งาน (thermal cycling) 20 รอบของตัวอย่างชุดที่ 1 หรือตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 นั้นแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ทุกตัวอย่างหลังรอบการใช้งาน 20 รอบนั้นยังมีสภาพที่เกือบสมบูรณ์ทุกตัวอย่าง แม้ว่าแต่ละตัวอย่างจะมีปริมาณขี้ผึ้งพาราฟินแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยเฉพาะตัวอย่างที่ 4 มีปริมาณขี้ผึ้งพาราฟินมากถึง 75% และมีปริมาณพอลิเมอร์ HDPE เพียง 25% ซึ่งน่าจะเป็นตัวอย่างที่มีการเสื่อมสภาพ เช่น มีรอยแตก (crack) ที่ผิวเนื่องจาก thermal stress หรือมีการหดตัว (shrinkage) เนื่องจากมีขี้ผึ้งพาราฟินรั่วไหลออกจากโครงสร้างพอลิเมอร์ แต่ตัวอย่างที่ 4 ก็ยังมีสภาพที่ดีหลังรอบการใช้งาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างพอลิเมอร์ที่เกิดจาก HDPE นั้นมีความแข็งแรงสูง ขี้ผึ้งพาราฟินมีการกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพอลิเมอร์อย่างเสถียรและจุดหลอมเหลวที่ห่างกันอย่างมากของขี้ผึ้งพาราฟินและ HDPE ก็ส่งผลต่อความคงทนต่อการใช้งานอย่างชัดเจนเช่นเดียวกัน

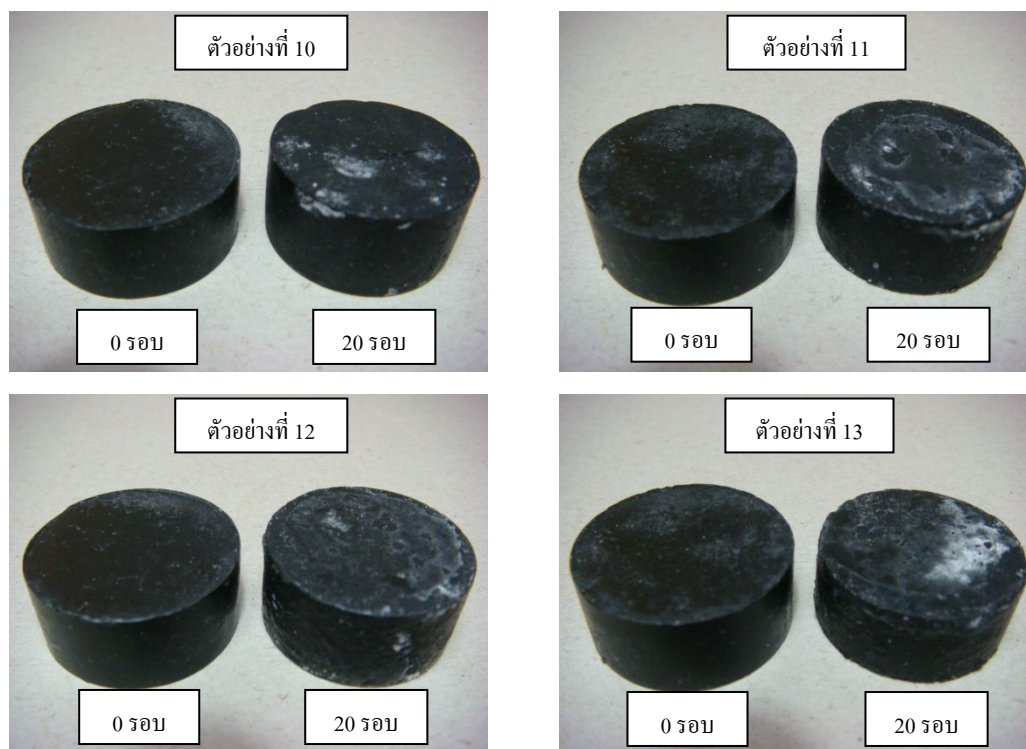


ภาพที่ 66 ผลิตภัณฑ์ shape stabilized PCM ตัวอย่างชุดที่ 2 ก่อนและหลังการใช้งาน 20 รอบ

จากภาพที่ 66 จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์ shape stabilized PCM ตัวอย่างที่ 5 ซึ่งประกอบด้วยขี้ผึ้งพาราฟิน 55% และ LDPE 45% จะมีการแตกร้าวที่ผิว (peeling) ปรากฏให้เห็น ตัวอย่างที่ 6 และ 7 ก็มีรอยแตกร้าวที่ผิวเล็กน้อยเช่นกัน แต่สำหรับตัวอย่างที่ 9 นั้นซึ่งมีส่วนประกอบขี้ผึ้งพาราฟิน 55% และ EVA 45% นั้นบริเวณผิวจะไม่มีรอยแตกร้าว โดยรอยแตกร้าวที่ผิวนั้นเกิดมาจาก thermal stress ซึ่งเกิดมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ในสถานะของแข็งและของเหลวของขี้ผึ้งพาราฟิน โดยในขั้นตอนลดอุณหภูมิ (cooling down) นั้น ส่วนแรกที่ขี้ผึ้งพาราฟินเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งคือบริเวณผิว ความหนาแน่นบริเวณผิวจึงเพิ่มขึ้น ในขณะที่ขี้ผึ้งพาราฟินบริเวณตรงกลางชิ้นงานยังอยู่ในสถานะของเหลว ดังนั้นความหนาแน่นตรงกลางชิ้นงานจึงน้อยกว่าความหนาแน่นบริเวณด้านผิวนอก และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่ผิวนอกอย่างมาก จึงทำให้

เกิดรอยแตกร้าวบริเวณผิวถึงแม้ว่าอุณหภูมิในบรรยากาศนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ แต่เมื่อผ่านไปหลายรอบการใช้งาน รอยแตกร้าวก็เกิดขึ้น

และในกรณีผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณ EVA สูงไม่เกิดรอยแตกร้าวที่เกิดจาก thermal stress ที่ผิวหนังนั้นเนื่องจาก EVA สามารถสร้างโครงสร้างพอลิเมอร์ที่เสถียรกว่า และมีความเป็นเนื้อเดียวกันกับซีฟี่พาราฟิน (homogenous) มากกว่ากรณีที่มี LDPE ผสม ซึ่งสามารถสังเกตได้จากผลการทดลอง ตัวอย่างที่มีโคพอลิเมอร์ในสารประกอบมากกว่าจะมีรอยแตกร้าวและรอยแตกร้าวที่ผิวหนังน้อยกว่า และตัวอย่างที่ 9 ซึ่งไม่มี LDPE เลยให้ผลที่ดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่มีปริมาณ EVA มากนั้นหลังผ่านการ thermal cycling นั้นก็มีการหดตัวของผลิตภัณฑ์ (shrinkage) มากกว่าเช่นกัน เนื่องจากความอ่อนตัวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเมื่อผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูง ซึ่งโคพอลิเมอร์มีการหลอมละลายไปบ้างแล้ว ณ อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสซึ่งสามารถสังเกตได้จากกราฟ DSC ในหัวข้อที่ 2 ซีฟี่พาราฟินจึงสามารถแพร่ (diffuse) ออกมาได้ง่ายกว่าในกรณีที่มีโครงสร้างแข็งแรงอย่าง LDPE ผสมกับ EVA หรือ LDPE อย่างเดียว ดังนั้นตัวอย่างที่มี EVA มากจึงมีการหดตัวมากกว่าซึ่งเกิดมาจากการแพร่ออกมาของซีฟี่พาราฟินแล้วละลายไปกับน้ำใน water bath แต่อย่างไรก็ตามลักษณะการหดตัวก็ถือว่าค่อนข้างน้อยมากหากเทียบกับการทดลองชุดที่ 3 ซึ่งมีผงกราฟไฟต์ผสมอยู่ด้วย

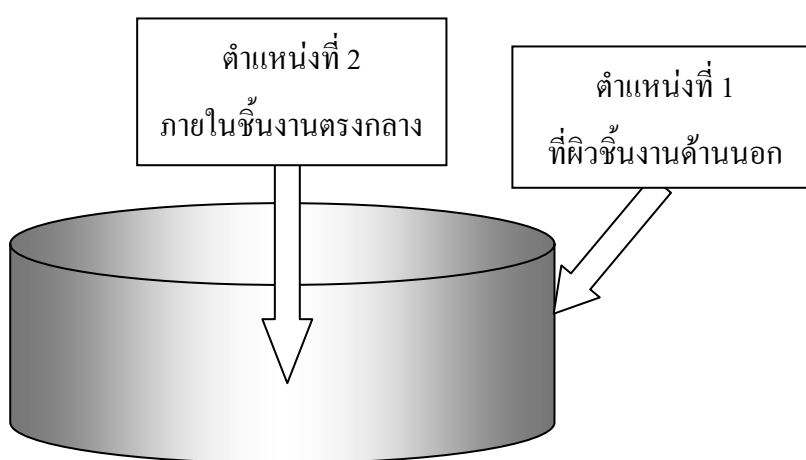


ภาพที่ 67 ผลิตกัณฑ์ shape stabilized PCM ตัวอย่างชุดที่ 3 ก่อนและหลังการใช้งาน 20 รอบ

จากภาพที่ 67 จะสังเกตได้ว่าแต่ละตัวอย่างมีขี้ผึ้งพาราฟินติดอยู่รอบบริเวณผิวนอกของผลิตกัณฑ์ โดยเฉพาะตัวอย่างที่มีปริมาณผงกราฟไฟท์เยอะ และยังเห็นได้ชัดเจนว่าตัวอย่างที่มีปริมาณผงกราฟไฟท์สูงนั้น ผลิตกัณฑ์หลังผ่านการ thermal cycling จะมีการหดตัวหรือเสียสภาพสูง ดังเช่นตัวอย่างที่ 13 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าปริมาณของผงกราฟไฟท์นั้นส่งผลกระทบต่อโครงสร้างพอลิเมอร์ โดยถ้ายังมีปริมาณสูงจะหมายถึงปริมาณโครงสร้างพอลิเมอร์ที่น้อยลงและผลิตกัณฑ์ที่ได้อ่อนแอลง ขี้ผึ้งพาราฟินที่กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพอลิเมอร์จะแพร่ออกมายังผิวภายนอกได้ง่ายยิ่งขึ้น เป็นสาเหตุทำให้ผลิตกัณฑ์หดตัวเมื่อผ่านรอบการใช้งาน

4. การศึกษาหาความสัมพันธ์ทางความร้อนหลังผ่านการใช้งาน 20 รอบ

ผลิตภัณฑ์ shape stabilized PCM ทั้ง 13 ตัวอย่างที่ผ่านรอบการใช้งาน (thermal cycling) 20 รอบ ถูกนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC อีกครั้ง เพื่อเปรียบเทียบลักษณะคุณสมบัติต่างๆที่เปลี่ยนไปหลังการใช้งาน โดยจะวิเคราะห์ 2 ตำแหน่งบนตัวอย่าง ตำแหน่งที่ 1 คือ บริเวณผิวด้านนอกของตัวอย่างที่สัมผัสกับน้ำใน water bath โดยตรง และตำแหน่งที่ 2 คือบริเวณตรงกลางด้านในของผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 ตำแหน่งที่จะนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

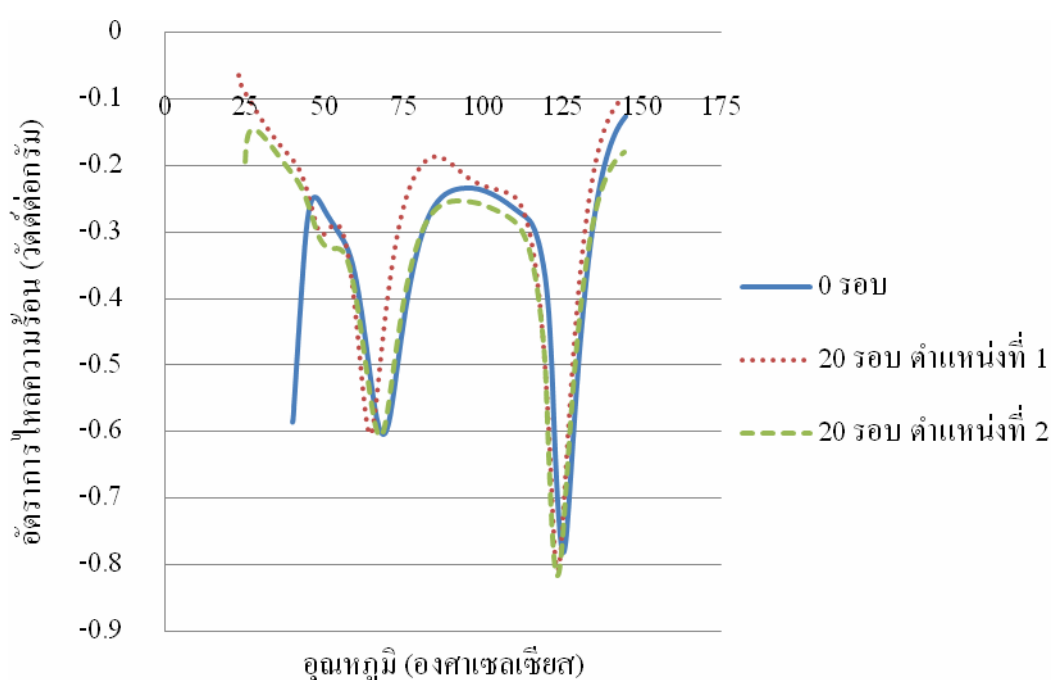
4.1 สมบัติทางความร้อนหลังรอบการใช้งาน 20 รอบของชุดที่ 1 (ตัวอย่างที่ 1 ถึง 4)

ตารางที่ 21 คุณสมบัติทางความร้อนหลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างชุดที่ 1

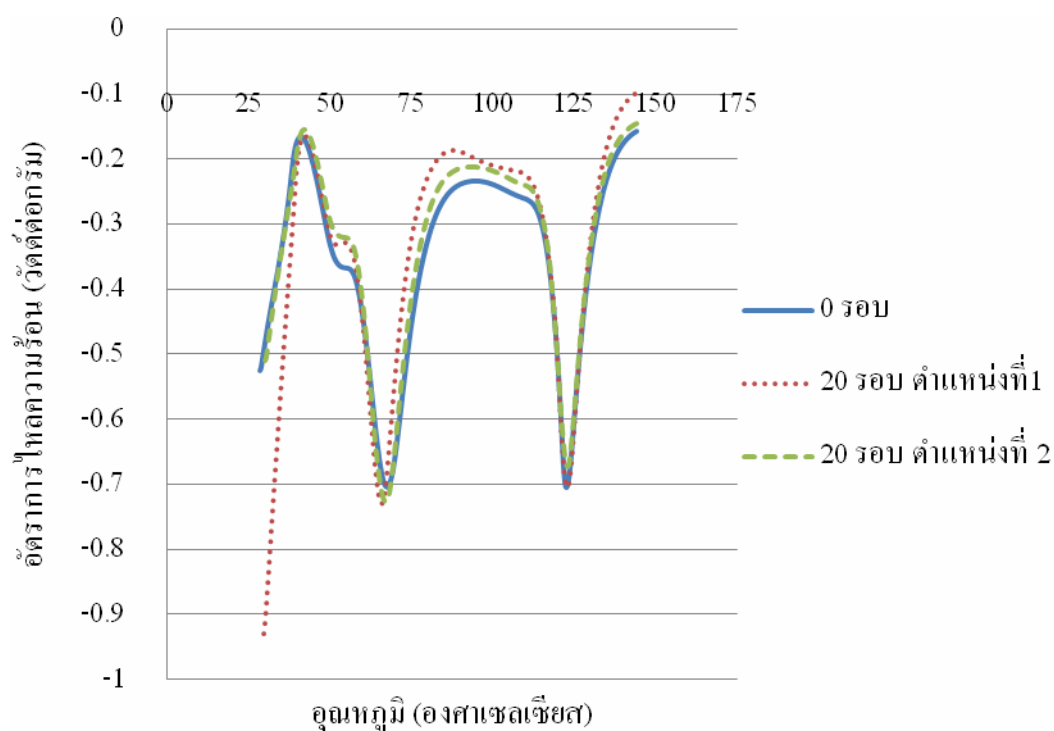
ตัวอย่าง	Mp.	Mp.	%	Mp.	%	λ	λ	%	λ	%
		1.	error	2.	error		1.	error	2.	error
1	68.45	64.58	5.65	67.66	1.15	70.95	69.94	1.42	70.54	0.58
2	67.48	65.82	2.46	67.12	0.53	118.60	105.2	11.29	114.1	3.79
3	68.99	67.03	2.84	69.34	0.51	125.60	103.0	18	111.5	11.22
4	67.67	66.25	2.09	67.34	0.48	131.80	121.0	8.19	131.0	0.61

หมายเหตุ 1. Mp. ย่อมาจาก melting point หมายถึงจุดหลอมเหลวในหน่วยของศาเซลเซียสและตัวเลขด้านล่างแสดงถึงตำแหน่งของตัวอย่าง

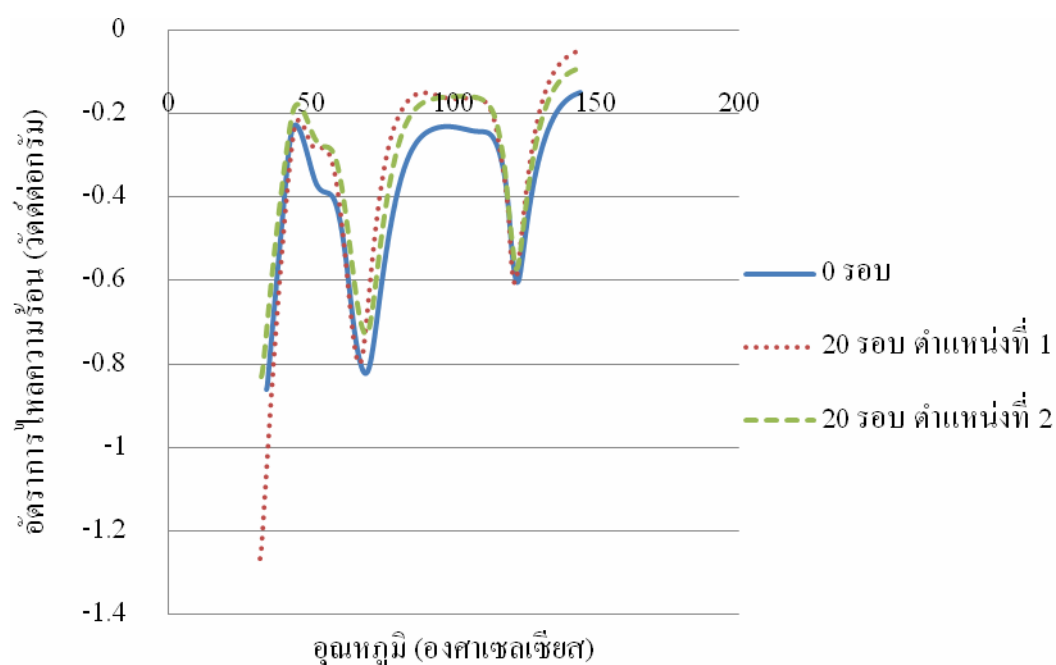
2. % error หมายถึงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเทียบกับตัวอย่างก่อนการใช้งาน 20 รอบ
3. λ หมายถึงค่าความร้อนแฝงในหน่วยจูลต่อกรัมและตัวเลขด้านล่างแสดงถึงตำแหน่งของตัวอย่าง
4. ใช้อัตราการเพิ่มความร้อน (heating rate) ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
5. ค่าความร้อนแฝงเป็นของขี้ผึ้งพาราฟินในสารตัวอย่างในช่วง 40-90 องศาเซลเซียส และเป็นค่าโดยประมาณเนื่องจากกราฟ DSC ที่ได้ไม่แสดง base line อย่างชัดเจน



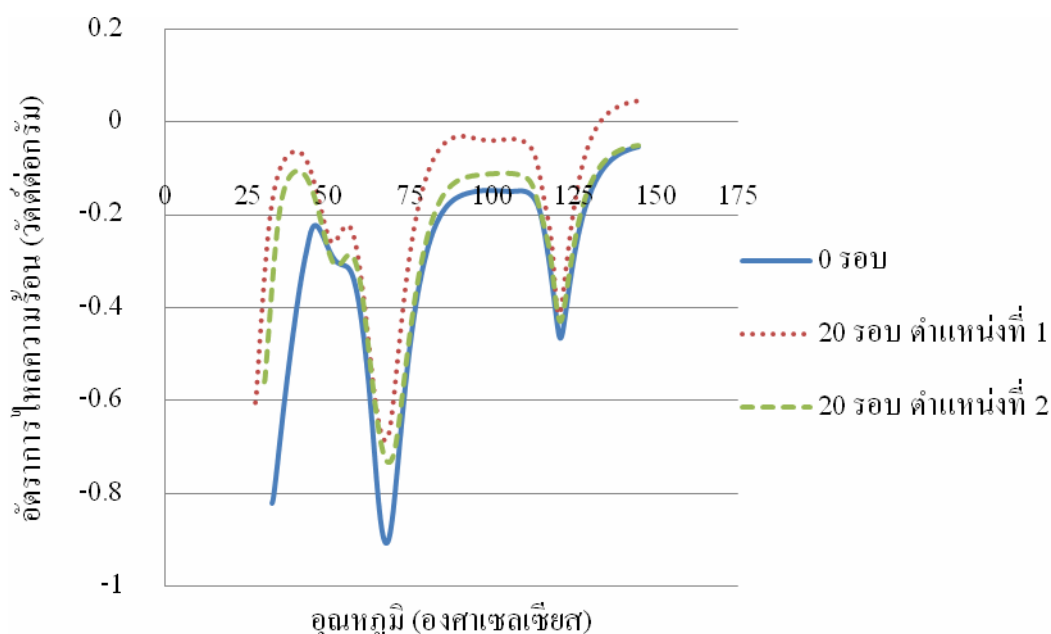
ภาพที่ 68 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 1



ภาพที่ 69 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 2



ภาพที่ 70 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 3



ภาพที่ 71 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 4

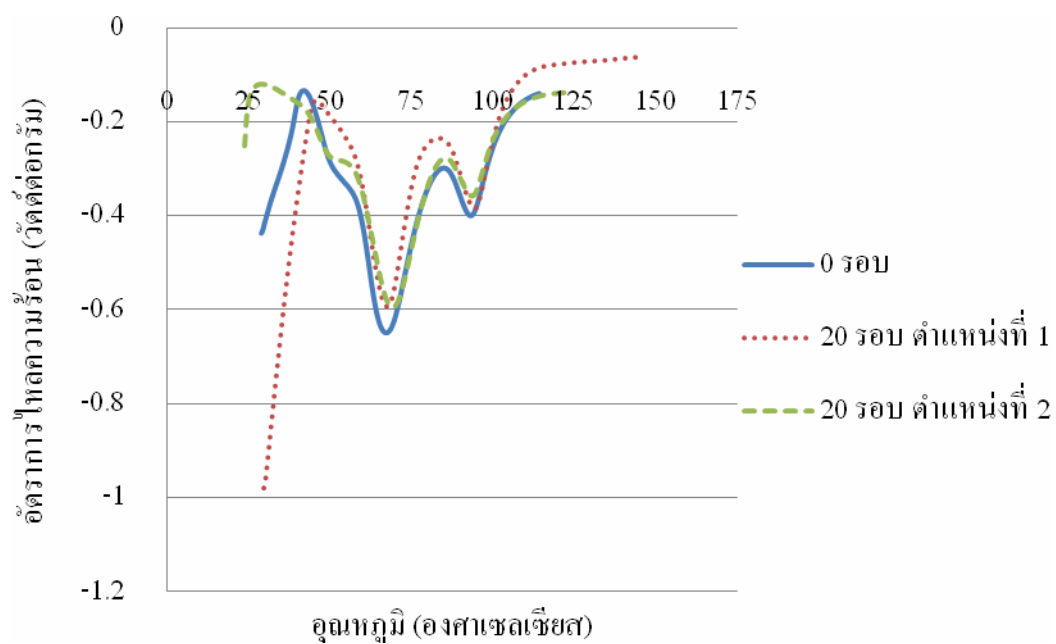
จากตารางที่ 21 และภาพที่ 68 ถึง 71 จะเห็นว่าเมื่อผลิตภัณฑ์ผ่านรอบการใช้งาน 20 รอบ แล้วคุณสมบัติทางความร้อนจะเปลี่ยนไป โดยในตำแหน่งที่ 1 หรือตำแหน่งที่อยู่บริเวณผิวนอก ชิ้นงานจะมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปมากกว่าบริเวณด้านในชิ้นงาน โดยค่าจุดหลอมเหลวและค่าความร้อนแฝงจะลดลง ในขณะที่ค่าดังกล่าวในตำแหน่งที่ 2 จะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าก่อนรอบการใช้งาน ดังสามารถสังเกตได้จากเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนที่เทียบกับผลิตภัณฑ์ก่อนรอบการใช้งาน เนื่องจากที่ตำแหน่งที่ 1 จะมีการสัมผัสกับน้ำใน water bath ที่มีอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส โดยตรง ทำให้ซีฟี่พาราฟินที่กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพอลิเมอร์บริเวณผิวนอกละลายและแพร่ออกจากชิ้นงาน ทำให้จุดหลอมเหลวและค่าความร้อนแฝงในตำแหน่งนี้มีค่าเปลี่ยนไป โดยปริมาณสัดส่วนของซีฟี่พาราฟินและ HDPE ของแต่ละตัวอย่างที่เปลี่ยนไป ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติทางความร้อนหลังรอบการใช้งานนัก อาจเนื่องมาจาก HDPE สามารถสร้างโครงสร้างที่แข็งแรงและซีฟี่พาราฟินกระจายตัวอยู่ได้ดี และจุดหลอมเหลวที่ห่างกันอย่างมากของซีฟี่พาราฟินและ HDPE ดังสามารถเปรียบเทียบได้กับภาพที่ 65 ซึ่งเป็นภาพของผลิตภัณฑ์หลังรอบการใช้งาน 20 รอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าลักษณะภายนอกของแต่ละตัวอย่างยังมีสภาพค่อนข้างสมบูรณ์มาก

4.2 สมบัติทางความร้อนหลังรอบการใช้งาน 20 รอบของชุดที่ 2 (ตัวอย่างที่ 5 ถึง 9)

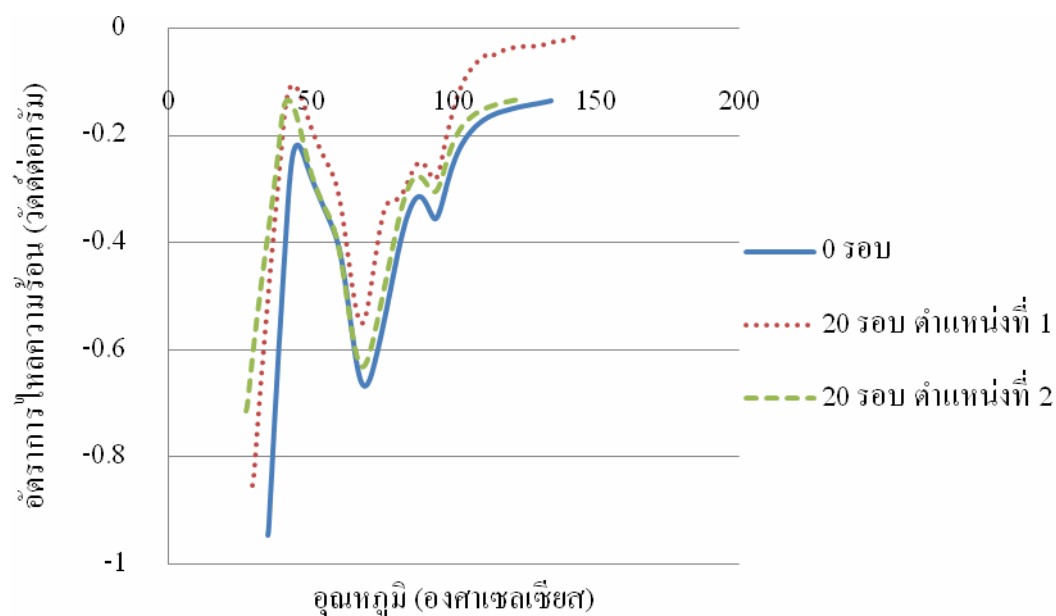
ตารางที่ 22 คุณสมบัติทางความร้อนหลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างชุดที่ 2

ตัวอย่าง	Mp.	Mp.	%	Mp.	%	λ	λ	%	λ	%
		1.	error	2.	error		1.	error	2.	error
5	66.73	67.35	0.93	69.15	3.62	95.46	65.93	30.93	76.03	20.35
6	67.68	67.51	0.25	67.64	0.06	104.10	75.62	27.36	103.8	0.29
7	66.41	67.57	1.75	68.57	3.25	110.30	93.83	14.93	81.85	25.79
8	68.02	67.11	1.34	67.47	0.81	98.63	85.38	13.43	111.6	13.15
9	66.72	67.16	0.66	67.22	0.75	-	58.31	-	-	-

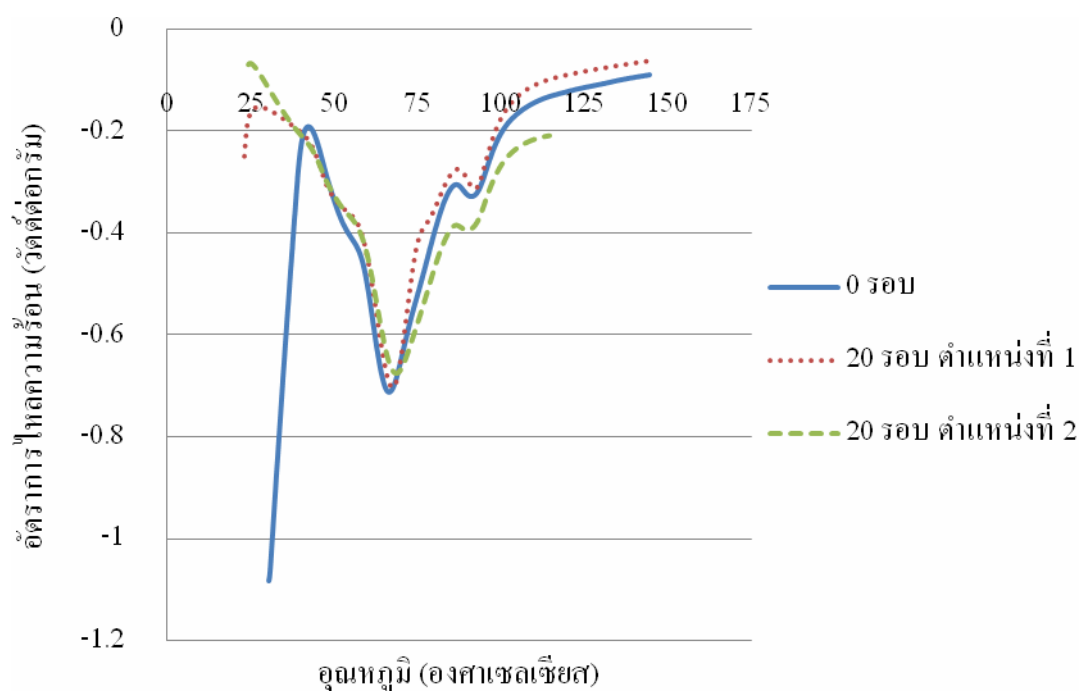
- หมายเหตุ**
1. Mp. ย่อมาจาก melting point หมายถึงจุดหลอมเหลวในหน่วยองศาเซลเซียสและตัวเลขด้านล่างแสดงถึงตำแหน่งของตัวอย่าง
 2. % error หมายถึงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเทียบกับตัวอย่างก่อนการใช้งาน 20 รอบ
 3. λ หมายถึงค่าความร้อนแฝงในหน่วยจูลต่อกรัมและตัวเลขด้านล่างแสดงถึงตำแหน่งของตัวอย่าง
 4. ใช้อัตราการเพิ่มความร้อน (heating rate) ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
 5. ค่าความร้อนแฝงเป็นของจีฟังก์พาราฟินในสารตัวอย่างในช่วง 40-90 องศาเซลเซียสและเป็นค่าโดยประมาณเนื่องจากกราฟ DSC ที่ได้ไม่แสดง base line อย่างชัดเจนและกราฟมีการ overlap โดยค่าความร้อนแฝงของจีฟังก์พาราฟินที่ได้จะมีค่าความจุความร้อนของแข็งของพอลิเมอร์รวมอยู่ด้วยจึงทำให้หาค่าความร้อนแฝงของจีฟังก์พาราฟินเปล่าไม่ได้
 6. ตัวอย่างที่ 9 ไม่สามารถหาค่าความร้อนแฝงได้ เนื่องจากกราฟ DSC มีการ overlap มากเกินไป



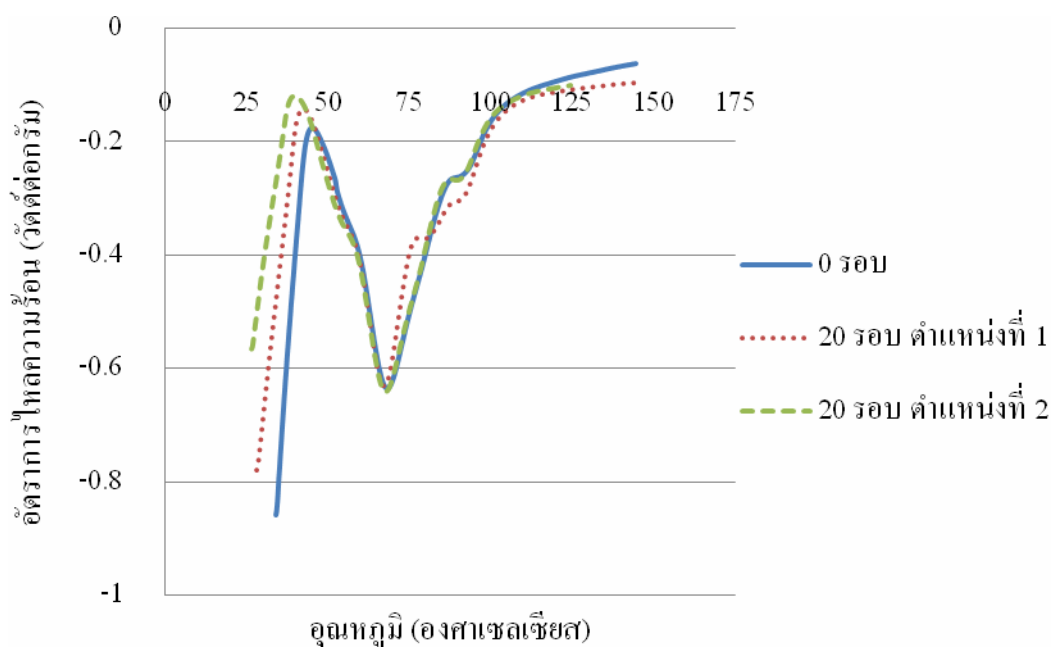
ภาพที่ 72 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 5



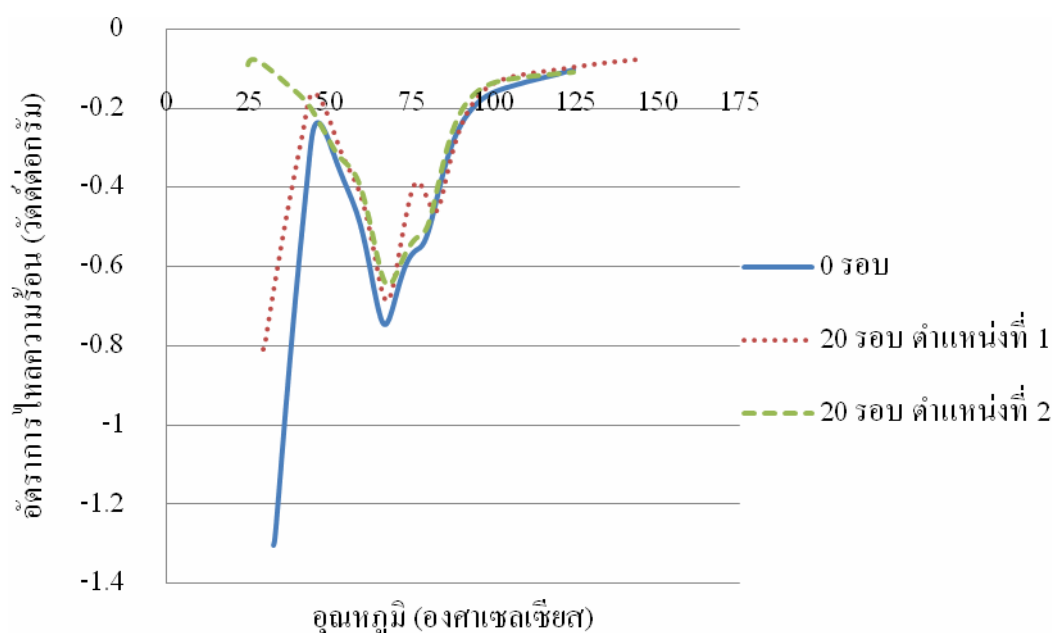
ภาพที่ 73 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 6



ภาพที่ 74 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 7



ภาพที่ 75 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 8



ภาพที่ 76 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 9

จากตารางที่ 22 และภาพที่ 72 ถึง 76 จะเห็นว่าเมื่อผลิตภัณฑ์ผ่านรอบการใช้งาน 20 รอบแล้วคุณสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างในชุดนี้จะเปลี่ยนไป ลักษณะการเปลี่ยนแปลงก่อนและหลังรอบการใช้งานของค่าจุดหลอมเหลวของทุกตัวอย่งนั้นค่อนข้างน้อย แต่การเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนแฝงค่อนข้างเยอะ ยกเว้นตัวอย่างที่ 6 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงน้อย และลักษณะของกราฟ DSC ของแต่ละตัวอย่างสามารถสังเกตได้ว่าลักษณะกราฟของก่อนรอบการใช้งานกับหลังรอบการใช้งานในตำแหน่งที่ 2 หรือตรงกลางด้านในตัวอย่งนั้น จะมีลักษณะกราฟใกล้เคียงกัน แต่กราฟ DSC หลังรอบการใช้งานในตำแหน่งที่ 1 นั้นค่อนข้างจะแตกต่างไป โดยกราฟที่ได้จะแสดงพีคชัดเจนขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้ชัดเจนในตัวอย่งที่ 9 ดังภาพที่ 76 โดยอาจเนื่องมาจากในตัวอย่งนี้มีเพียงจีฟี่พาราฟินและ EVA และมีปัญหาการหดตัวของตัวอย่งเนื่องมาจากความอ่อนตัวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเมื่อผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูง โพลีเมอร์มีการหลอมละลายไปบ้างแล้ว ณ อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ซึ่งสัมพันธ์กับภาพหลังรอบการใช้งานของตัวอย่งที่ 9 ในภาพที่ 66 และสำหรับตัวอย่งอื่นๆนั้น ตัวเลขมีความซับซ้อนค่อนข้างเยอะ ทำให้ยากแก่การวิเคราะห์ถึงกลไกการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน

4.3 สมบัติทางความร้อนหลังรอบการใช้งาน 20 รอบของชุดที่ 3 (ตัวอย่างที่ 10 ถึง 13)

ตารางที่ 23 คุณสมบัติทางความร้อนหลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างชุดที่ 3

ตัวอย่าง	Mp.	Mp.	%	Mp.	%	λ	λ	%	λ	%
		1.	error	2.	error		1.	error	2.	error
10	68.13	67.47	0.97	68.10	0.04	94.54	95.36	0.87	97.98	3.64
11	66.63	68.59	2.94	66.77	0.21	102.50	80.47	21.49	89.98	12.21
12	66.72	68.34	2.43	67.35	0.94	100.70	95.38	5.28	109.0	8.24
13	67.18	67.89	1.05	67.28	0.14	108.40	88.30	18.54	107.0	1.29

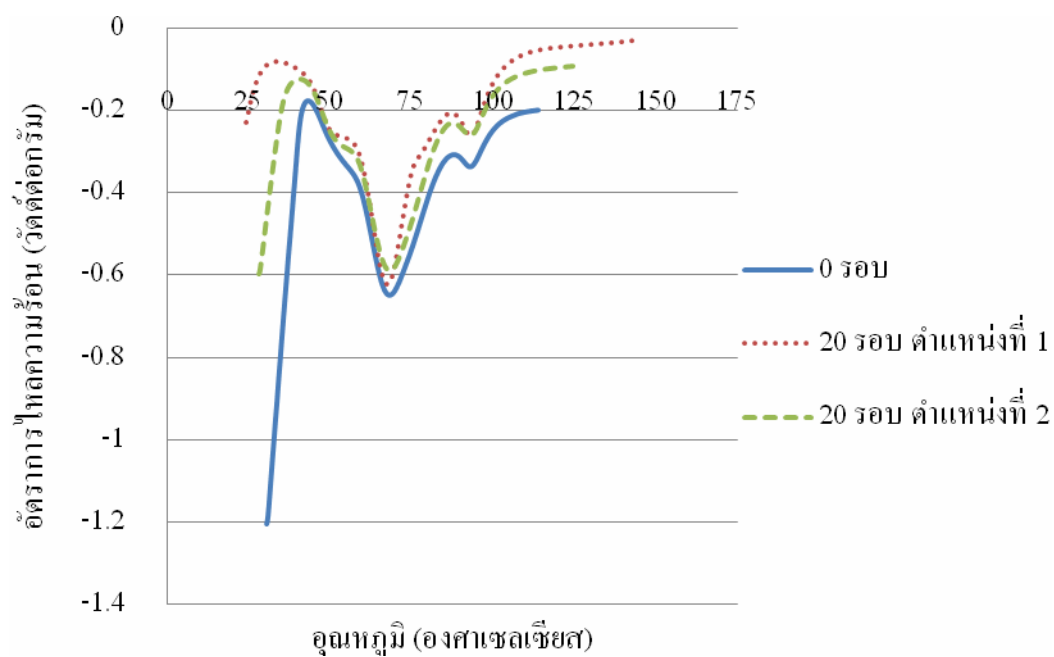
หมายเหตุ 1. Mp. ย่อมาจาก melting point หมายถึงจุดหลอมเหลวในหน่วยองศาเซลเซียสและตัวเลขด้านล่างแสดงถึงตำแหน่งของตัวอย่าง

2. % error หมายถึงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเทียบกับตัวอย่างก่อนการใช้งาน 20 รอบ

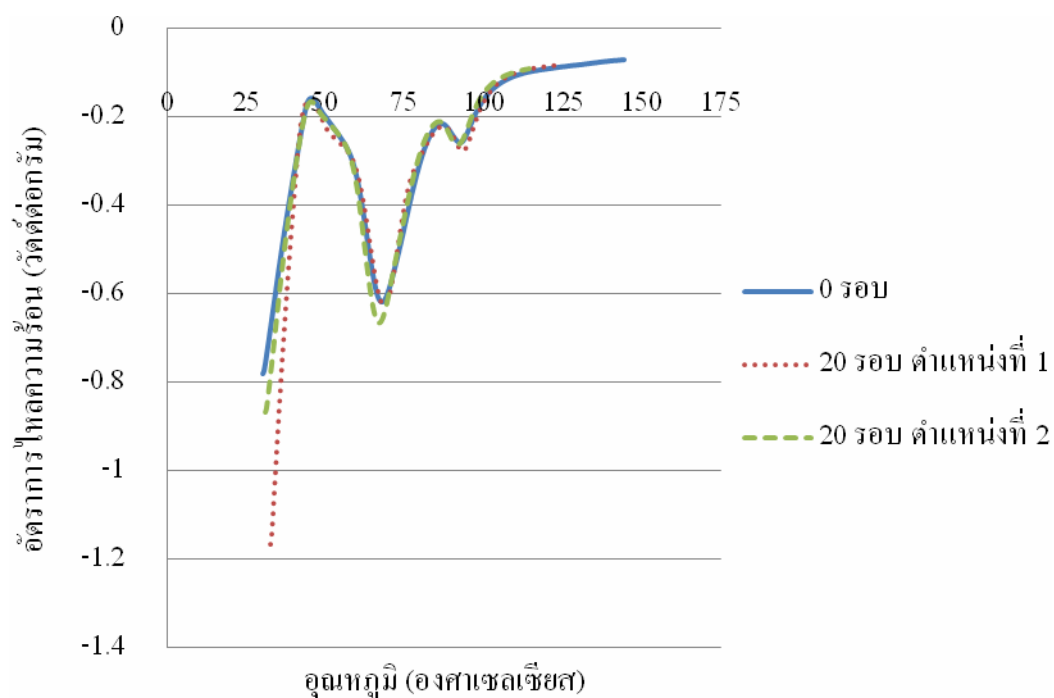
3. λ หมายถึงค่าความร้อนแฝงในหน่วยจูลต่อกรัมและตัวเลขด้านล่างแสดงถึงตำแหน่งของตัวอย่าง

4. ใช้อัตราการเพิ่มความร้อน (heating rate) ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

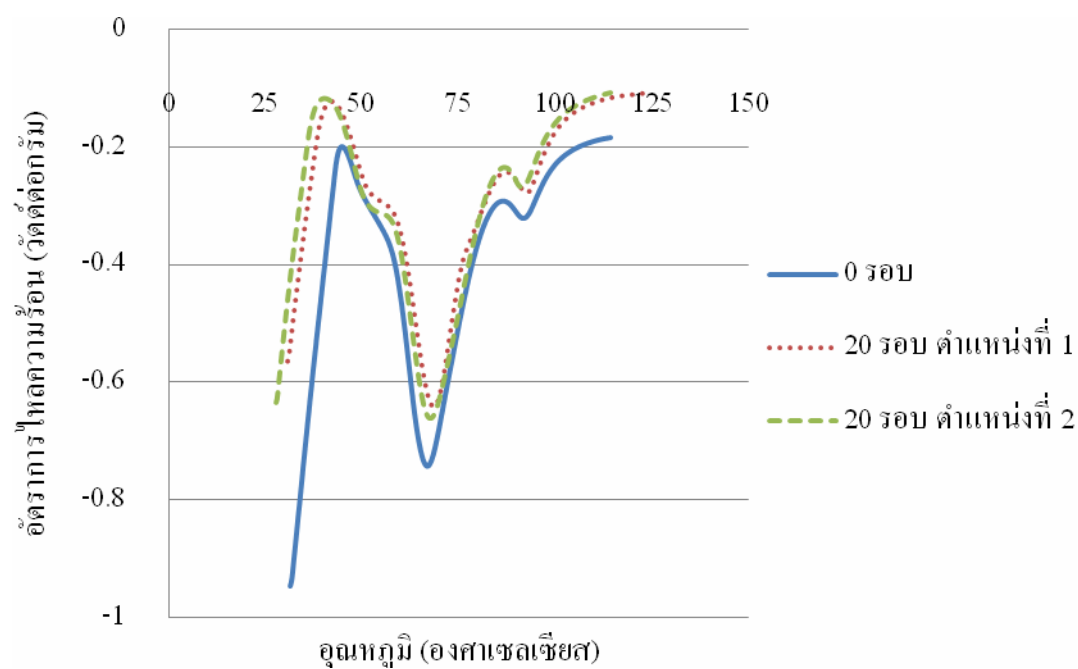
5. ค่าความร้อนแฝงเป็นของซีฟิ่งพาราฟินในสารตัวอย่างในช่วง 40-90 องศาเซลเซียสและเป็นค่าโดยประมาณเนื่องจากกราฟ DSC ที่ได้ไม่แสดง base line อย่างชัดเจนและกราฟมีการ overlap โดยค่าความร้อนแฝงของซีฟิ่งพาราฟินที่ได้จะมีค่าความจุความร้อนของแข็งของพอลิเมอร์รวมอยู่ด้วยจึงทำให้หาค่าความร้อนแฝงของซีฟิ่งพาราฟินเปล่าไม่ได้



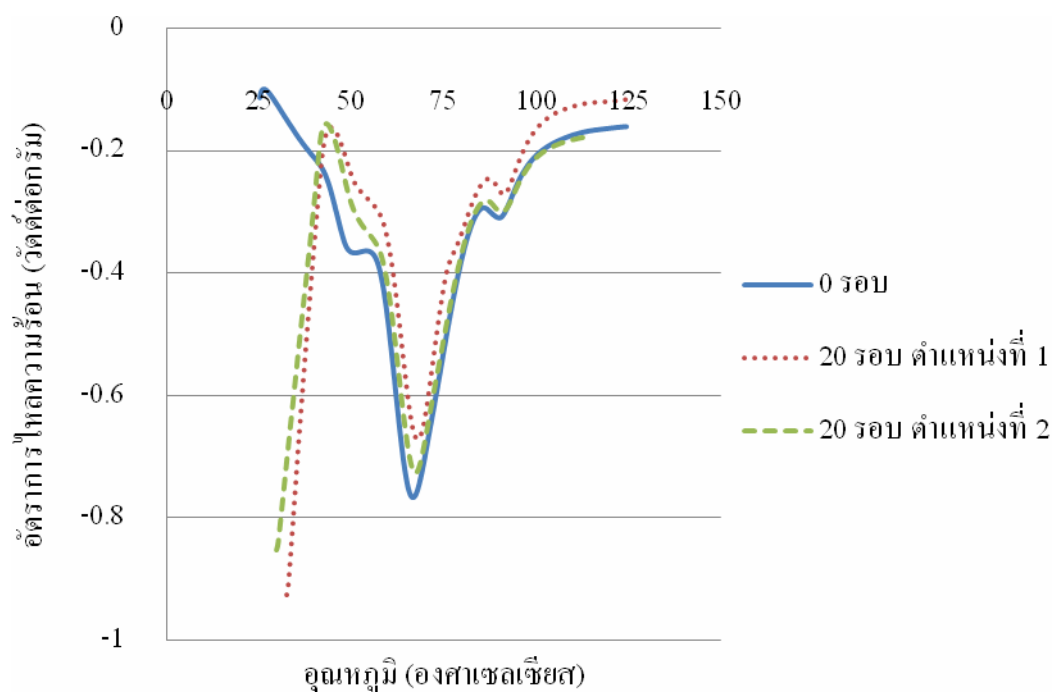
ภาพที่ 77 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 10



ภาพที่ 78 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 11



ภาพที่ 79 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 12



ภาพที่ 80 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 13

จากตารางที่ 23 และภาพที่ 77 ถึง 80 นั้นสังเกตได้ว่า ตัวอย่างหลังผ่านการใช้งาน 20 รอบ ในตำแหน่งที่ 1 นั้นมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางความร้อนจากก่อนรอบการใช้งานมากกว่า ตำแหน่งที่ 2 ในเกือบทุกตัวอย่าง โดยถือว่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักในด้านคุณสมบัติทางความร้อน ถึงแม้ว่าลักษณะของชิ้นงานภายนอกมีการหดตัว และเสื่อมสภาพไปก็ตาม ดังภาพที่ 67 ซึ่งกล่าวได้ว่าการเพิ่มปริมาณผงกราฟไฟท์ในตัวอย่างนั้น ไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางความร้อนหลังรอบการใช้งาน 20 รอบมากนัก แต่จะส่งผลกระทบต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์มากกว่า

5. การศึกษาหาค่าความหนาแน่นของ Shape stabilized PCM

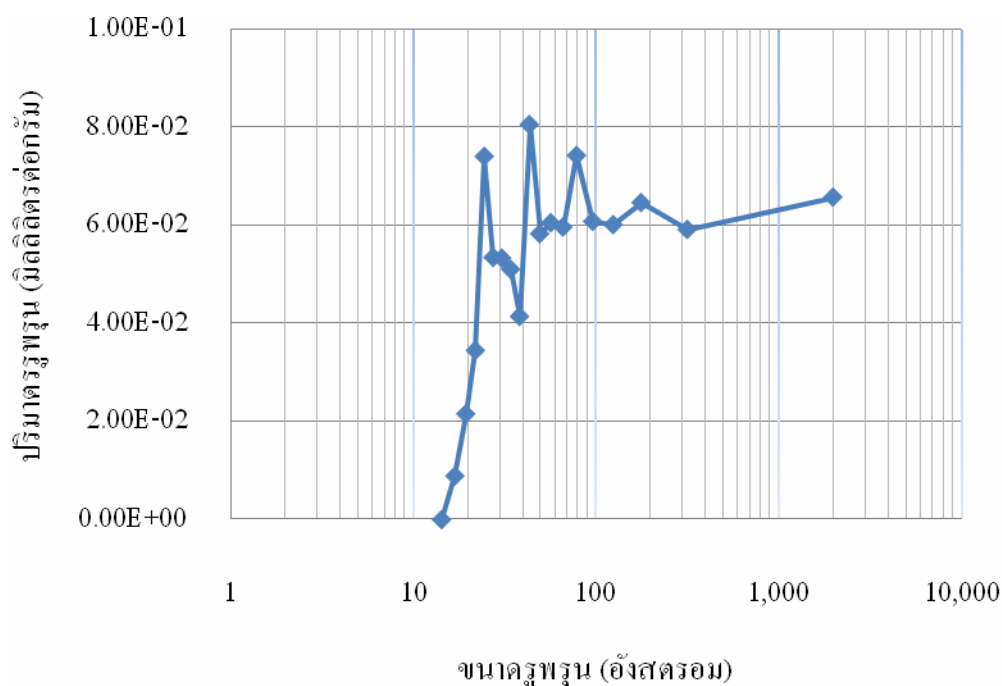
ตารางที่ 24 ค่าความหนาแน่นของ shape stabilized PCM

ตัวอย่างที่	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
1	0.9282
2	0.9456
3	0.9088
4	0.9229
5	0.9172
6	0.9236
7	0.9317
8	0.9179
9	0.9167
10	0.9837
11	0.9965
12	1.0041
13	1.0348

ตารางที่ 24 แสดงถึงค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ shape stabilized PCM ทั้ง 3 ชุด โดยจะเห็นว่าค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.90 ถึง 1.03 และปริมาณสัดส่วนของซีฟี่พาราฟินกับพอลิเมอร์ ไม่ได้ส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญกับตัวเลขค่าความหนาแน่นมากนัก แต่ปริมาณของผงกราฟไฟท์ในตัวอย่างส่งผลต่อค่าความหนาแน่นอย่างเห็นได้ชัด โดยอนุภาคผงกราฟไฟท์ซึ่งมีขนาดเล็ก

มากจะไปกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์และซีฟิ่งพาราฟิน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากชุดตัวอย่างที่ 3 โดยหากปริมาณผงกราฟไฟท์มาก ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างจะมากขึ้นด้วย

ข้อมูลพื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน และปริมาตรของผงกราฟไฟท์ที่ได้จากเครื่อง Nitrogen Adsorption รุ่น Autosorb1 แสดงดังภาพที่ 81 และตารางที่ 25



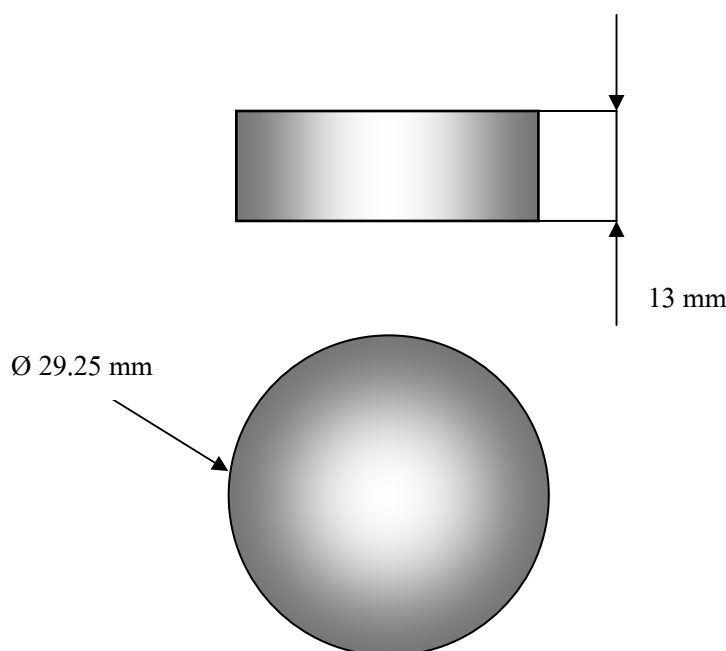
ภาพที่ 81 การกระจายขนาดของรูพรุนของผงกราฟไฟท์

ตารางที่ 25 ข้อมูลพื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน และปริมาตรของผงกราฟไฟท์

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (อังสตรอม)	ปริมาตร (มิลลิลิตรต่อกรัม)
ผงกราฟไฟท์	50.88	24.51	0.14

6. การศึกษาหาค่าการทดสอบแรงกด (Compression test)

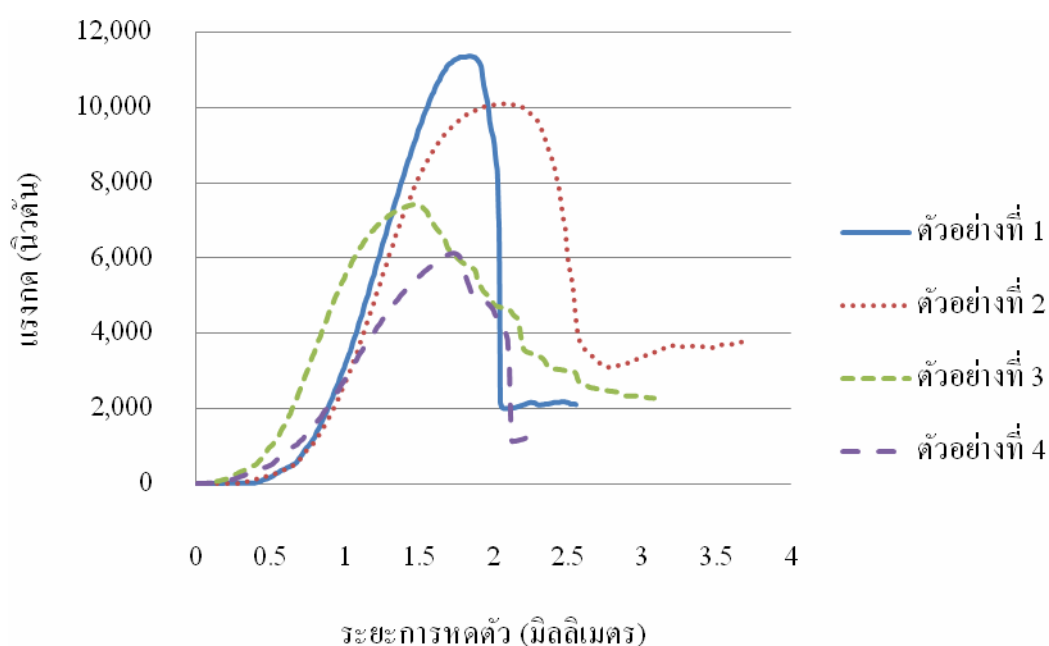
ผลิตภัณฑ์ shape stabilized PCM ทั้ง 3 ชุดจะถูกนำมาทดสอบแรงกด เพื่อที่จะศึกษาถึงผลกระทบของค่าส่วนประกอบในตัวอย่างต่อความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ โดยชิ้นงานทั้ง 13 ตัวอย่าง จะถูกขึ้นรูปด้วยเครื่อง hot mount ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาเท่ากัน ดังภาพที่ 38 จากนั้นใช้เครื่องทดสอบแรงกดยี่ห้อ HOUNSFIELD รุ่น H50KS ทำการกดชิ้นงานด้วยอัตรากดเท่ากันคือ 3 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดสอบจะแสดงโดยแบ่งเป็น 3 ชุด ดังนี้



ภาพที่ 38 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกด

6.1 การทดสอบแรงกดของชุดที่ 1 (ตัวอย่างที่ 1 ถึง 4)

shape stabilized PCM ชุดที่ 1 หรือตัวอย่างที่ 1 ถึง 4 ประกอบด้วย ขี้ผึ้งพาราฟินและ HDPE ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนปริมาณ paraffin : HDPE ซึ่งขี้ผึ้งพาราฟินจะกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพอลิเมอร์ของ HDPE และผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 26 และภาพที่ 82 และ 83

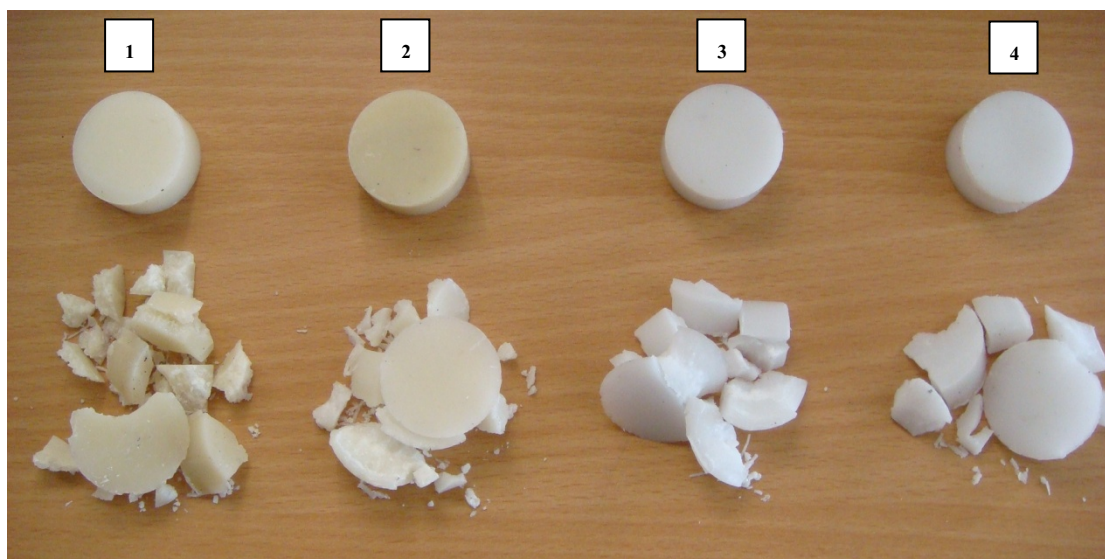


ภาพที่ 82 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะการหดตัวของตัวอย่างชุดที่ 1

ตารางที่ 26 ค่าทดสอบแรงกดของตัวอย่างชุดที่ 1 (ตัวอย่างที่ 1 ถึง 4)

ตัวอย่าง	พาราฟิน	HDPE	Compressive strength (MPa)	Max load (N)	At extensions (mm)
1	50	50	16.95	11,388	1.828
2	60	40	15.05	10,113	2.072
3	70	30	11.06	7,433	1.456
4	75	25	9.14	6,141	1.720

- หมายเหตุ 1. ค่า Compressive strength หมายถึงค่าการต้านทานแรงกด มีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล
2. ค่า Max load หมายถึงค่าแรงกดในหน่วยนิวตันที่มากที่สุดก่อนชิ้นงานจะเสียสภาพหรือแตกหัก
3. At extensions หมายถึงค่าระยะการหดตัวของตัวอย่างในหน่วยมิลลิเมตร ณ Max load



ภาพที่ 83 ลักษณะตัวอย่างชุดที่ 1 ก่อนและหลังทดสอบแรงกด

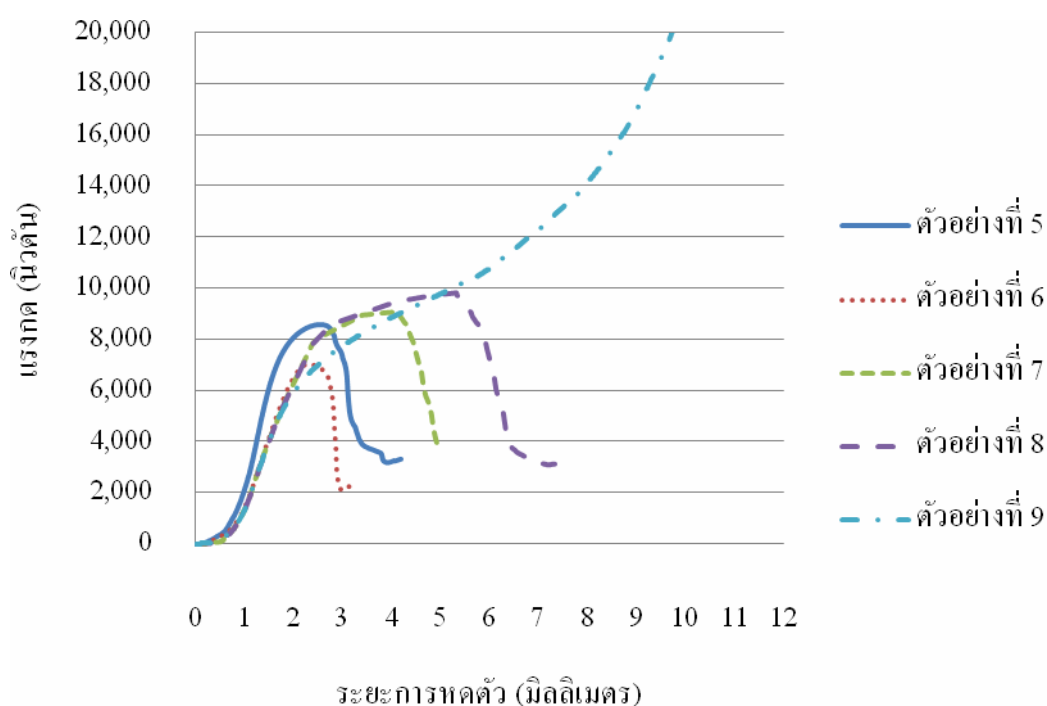
จากภาพที่ 82 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะการหดตัวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งกราฟนี้จะสัมพันธ์กับค่าในตารางที่ 26 และหากพิจารณาถึงเส้นกราฟแล้วจะเห็นได้ว่าความชันของกราฟของตัวอย่างทั้ง 4 นั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยตัวอย่างที่มีปริมาณ HDPE มากจะมีความชันมากกว่า หรือตัวอย่างที่มีปริมาณซีฟี่พาราฟินมากกว่าจะมีความชันน้อยกว่า โดยตัวอย่างที่ 1 นั้นมีความชันมากที่สุดหมายถึงมีความแข็งแรงมากที่สุด ซึ่งหมายถึงเมื่อเพิ่มแรงกดลงไปในตัวอย่างไม่แต่ตัวอย่างมีระยะการหดตัวหรือระยะการโดนกดน้อย และหากเทียบกับตัวอย่างที่ HDPE น้อยและมีซีฟี่พาราฟินมากเช่นตัวอย่างที่ 4 ซึ่งกราฟมีความชันน้อย ซึ่งหมายถึงเมื่อเพิ่มแรงกดลงไปในตัวอย่างไม่แต่ตัวอย่างมีระยะการหดตัวหรือระยะการโดนกดมาก โดยจากตารางที่ 26 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่ 1 นั้นมีค่า compressive strength และค่า max load มากที่สุดถึง 16.95 เมกกะปาสกาลและ 11,388 นิวตันตามลำดับ และตัวอย่างที่ 4 นั้นมีค่าทั้งสองน้อยที่สุดคือ 9.14 เมกกะปาสกาลและ 6,141 นิวตัน ตามลำดับ หากเทียบกับปริมาณสัดส่วนของซีฟี่พาราฟินและ HDPE แล้ว จะกล่าวได้ว่า ค่า compressive strength และค่า max load นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณ HDPE เป็นหลัก หากมีปริมาณ HDPE มากค่าทั้งสองจะมาก ซึ่งหมายถึงมีความแข็งแรงมาก เนื่องมาจากมีโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่มากกว่านั่นเอง

อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่มีปริมาณ HDPE มากนั้นผลิตภัณฑ์ก็จะมีค่าความเปราะมากกว่าตัวอย่างที่มีปริมาณ HDPE น้อยเช่นกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากลักษณะการแตกหักของตัวอย่าง ดัง

ภาพที่ 83 โดยตัวอย่างที่ 1 ซึ่งมีปริมาณ HDPE มากจะมีลักษณะการแตกเป็นชิ้นเล็กๆ แต่ตัวอย่างที่มี HDPE น้อยเช่นตัวอย่างที่ 4 จะมีลักษณะการแตกที่เป็นชิ้นค่อนข้างใหญ่กว่า

6.2 การทดสอบแรงกดของชุดที่ 2 (ตัวอย่างที่ 5 ถึง 9)

shape stabilized PCM ชุดที่ 2 หรือตัวอย่างที่ 5 ถึง 9 ประกอบด้วยขี้ผึ้งพาราฟิน LDPE และ EVA ซึ่งจะทำให้การปรับเปลี่ยนสัดส่วนปริมาณ paraffin : LDPE : EVA โดยมีปริมาณขี้ผึ้งพาราฟินคงที่ซึ่งขี้ผึ้งพาราฟินจะกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพอลิเมอร์ของ LDPE และ EVA ซึ่งผลการทดสอบแรงกดแสดงดังตารางที่ 27 กับภาพที่ 84 และ 85



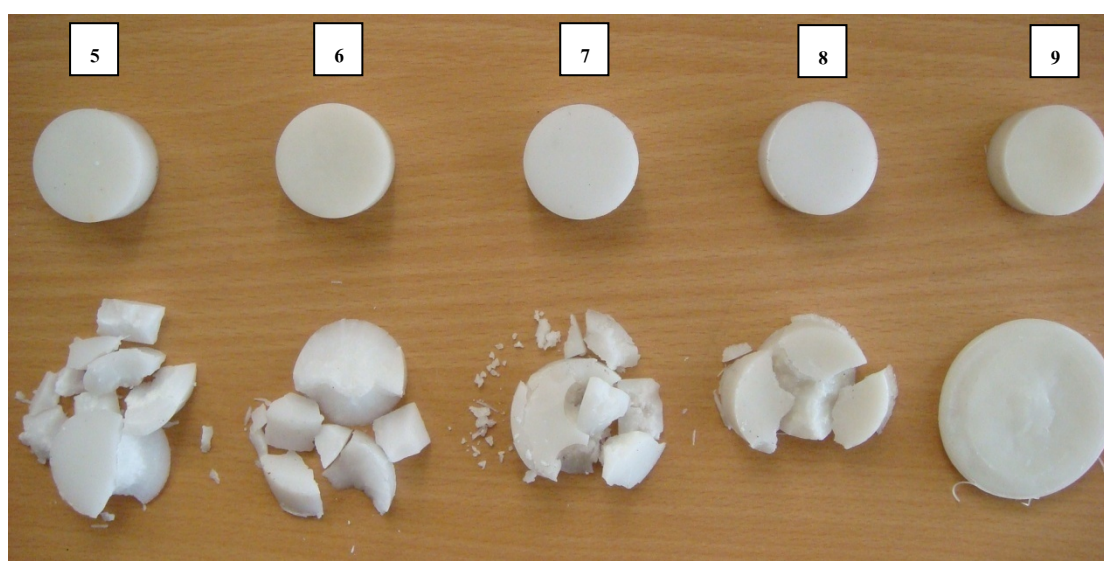
ภาพที่ 84 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะการหดตัวของตัวอย่างชุดที่ 2

ตารางที่ 27 ค่าทดสอบแรงกดของตัวอย่างชุดที่ 2 (ตัวอย่างที่ 5 ถึง 9)

ตัวอย่าง	พาราฟิน	LDPE	EVA	Compressive strength (MPa)	Max load (N)	At extensions (mm)
5	55	45	0	12.78	8,590	2.510
6	55	30	15	10.46	7,028	2.268

7	55	22.5	22.5	13.65	9,058	4.155
8	55	15	30	14.73	9,808	5.325
9	55	0	45	>69.5	>46,700	>12.6

- หมายเหตุ 1. ค่า Compressive strength หมายถึงค่าการต้านทานแรงกด มีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล
2. ค่า Max load หมายถึงค่าแรงกดในหน่วยนิวตันที่มากที่สุดก่อนชิ้นงานจะเสียสภาพหรือแตกหัก
3. At extensions หมายถึงค่าระยะการหดตัวของตัวอย่างในหน่วยมิลลิเมตร ณ Max load



ภาพที่ 85 ลักษณะตัวอย่างชุดที่ 2 ก่อนและหลังทดสอบแรงกด

จากภาพที่ 84 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะการหดตัวของตัวอย่างชุดที่ 2 จะเห็นว่าตัวอย่างที่ 5 ซึ่งไม่มีส่วนประกอบของ EVA เลย จะมีความชันของกราฟมากที่สุด ซึ่งหมายถึงมีความแข็งมากที่สุด และสำหรับตัวอย่างอื่นๆที่มีการเพิ่มปริมาณของ EVA นั้นสังเกตได้ว่ายิ่งเพิ่มปริมาณของ EVA ขึ้น ผลิตภัณฑ์ shape stabilized PCM ก็ยิ่งแตกหักได้ยากขึ้น ซึ่งหมายถึง EVA จะช่วยปรับปรุงค่า compressive strength หรือค่าการต้านทานแรงกดของตัวอย่าง โดยจากตารางที่ 27 จะเห็นว่าตัวอย่างที่ 6 ซึ่งมีปริมาณของ EVA 15% นั้นมีค่า compressive strength และ max load ที่ 10.46 เมกะปาสกาลและ 7,028 นิวตัน ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างที่ 9 ซึ่งมีปริมาณ EVA 45% มีค่ามากกว่า 69.5 เมกะปาสกาลและมากกว่า 46,700 นิวตัน ตามลำดับ ทั้งนี้ใช้คำว่ามากกว่าเนื่องจากหวัคของเครื่องทดสอบแรงกดที่ใช้ทดสอบสามารถกดได้มากที่สุด 46,700 นิวตัน และในกรณีตัวอย่างที่ 9 เมื่อกดมาถึงค่านี้แล้วตัวอย่างยังไม่มีการแตกหักเกิดขึ้น

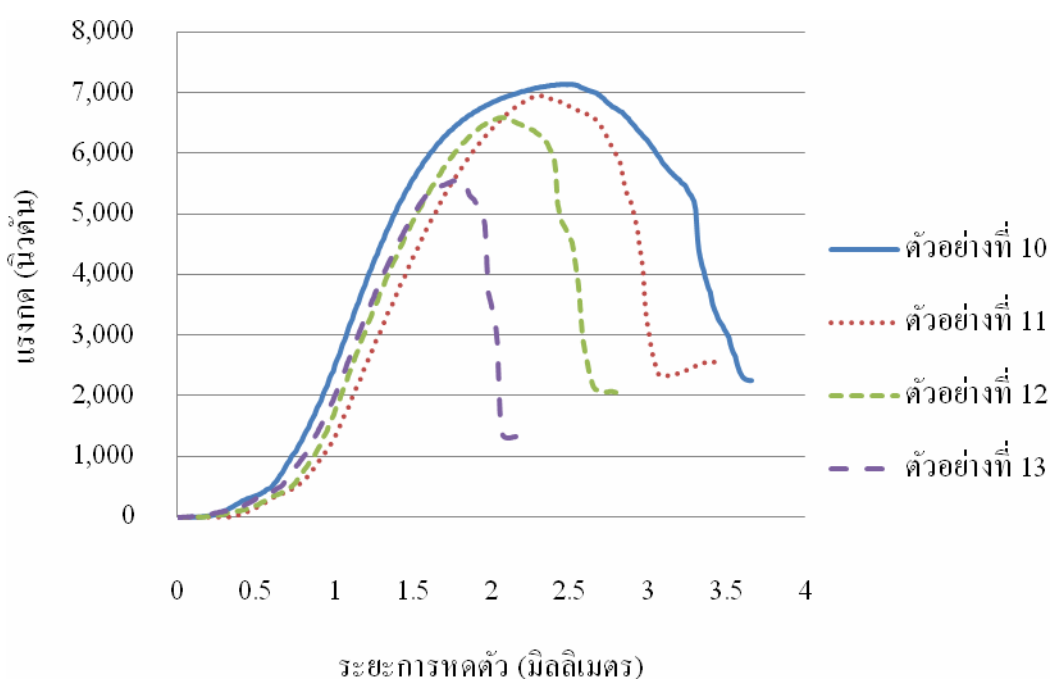
หากเปรียบเทียบเฉพาะตัวอย่างที่ 5 และตัวอย่างที่ 6 จะเห็นว่า ตัวอย่างที่ 5 นั้นมีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ (mechanical properties) เช่น compressive strength และ max load ที่ดีกว่าตัวอย่างที่ 6 ถึงแม้ว่าตัวอย่างที่ 16 จะมีปริมาณ EVA 15% ในขณะที่ตัวอย่างที่ 5 ไม่มี และสังเกตได้ว่าการเพิ่มปริมาณของ EVA ในตัวอย่างที่ 6 นั้นเพียงช่วยเพิ่มความอ่อนให้กับผลิตภัณฑ์เท่านั้นดังกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะการหดตัวในภาพที่ 84 ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณของโคพอลิเมอร์ที่น้อยเกินไป

ภาพที่ 85 แสดงลักษณะตัวอย่าง ก่อนและหลังทดสอบแรงกด สังเกตได้ว่าตัวอย่างที่ไม่มีโคพอลิเมอร์หรือตัวอย่างที่ 5 มีการแตกหักอย่างเป็นชิ้นเล็กๆ เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีความเปราะ แต่หากเพิ่มปริมาณ EVA การแตกหักของผลิตภัณฑ์จะลดลง และในตัวอย่างที่ 9 ไม่เกิดการแตกหักเลย แม้จะมีแรงกดมากถึง 46,700 นิวตันแล้วก็ตาม

จากผลการทดสอบตัวอย่างในชุดนี้นั้น สามารถกล่าวได้ว่าโคพอลิเมอร์ในปริมาณที่พอดีนั้นช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณโคพอลิเมอร์นั้นก็ทำให้ชิ้นงานมีความอ่อนและเหนียวเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เป็นผลมาจากสมบัติของโคพอลิเมอร์ EVA ซึ่งพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติคล้ายกับยางหรืออีลาสโตเมอร์ (elastomers) โดยตารางที่ 27 กับภาพที่ 84 และ 85 มีความสัมพันธ์กันอย่างชัดเจน

6.3 การทดสอบแรงกดของชุดที่ 3 (ตัวอย่างที่ 10 ถึง 13)

shape stabilized PCM ชุดที่ 3 หรือตัวอย่างที่ 10 ถึง 13 ประกอบด้วย ขี้ผึ้งพาราฟิน LDPE EVA และผงกราไฟท์ ซึ่งจะทำให้การปรับเปลี่ยนสัดส่วนปริมาณ paraffin : LDPE : EVA : graphite โดยมีปริมาณขี้ผึ้งพาราฟินคงที่ซึ่งขี้ผึ้งพาราฟินจะกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพอลิเมอร์ของ LDPE กับ EVA และมีปริมาณผงกราไฟท์ สำหรับผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 28 กับภาพที่ 86 และ 87

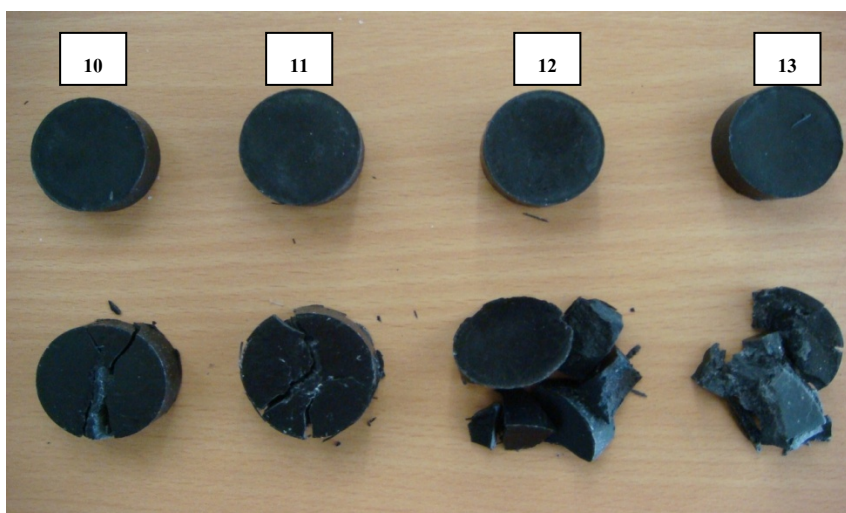


ภาพที่ 86 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะการหดตัวของตัวอย่างชุดที่ 3

ตารางที่ 28 ค่าทดสอบแรงกดของตัวอย่างชุดที่ 3 (ตัวอย่างที่ 10 ถึง 13)

ตัวอย่าง	พาราฟิน	LDPE	EVA	ผงกราไฟท์	Compressive strength (MPa)	Max load (N)	At extensions (mm)
10	55	27	13	5	10.63	7,140	2.436
11	55	25	10	10	10.37	6,968	2.296
12	55	20	10	15	9.81	6,593	2.056
13	55	15	10	20	8.27	5,558	1.778

- หมายเหตุ 1. ค่า Compressive strength หมายถึงค่าการต้านทานแรงกด มีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล
2. ค่า Max load หมายถึงค่าแรงกดในหน่วยนิวตันที่มากที่สุดก่อนชิ้นงานจะเสียสภาพหรือแตกหัก
3. At extensions หมายถึงค่าระยะการหดตัวของตัวอย่างในหน่วยมิลลิเมตร ณ Max load



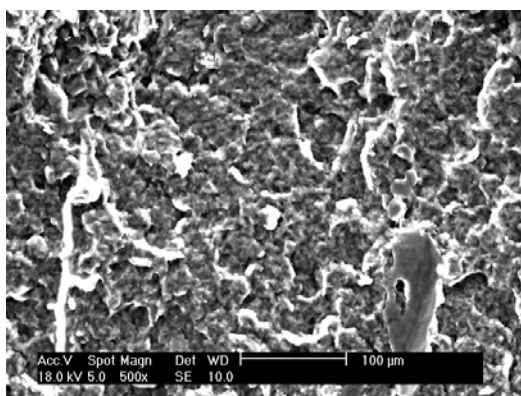
ภาพที่ 87 ลักษณะตัวอย่างชุดที่ 3 ก่อนและหลังทดสอบแรงกด

จากตารางที่ 28 และภาพที่ 86 เห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณผงกราไฟท์ลงไปในตัวอย่าง จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่า compressive strength และค่า max load ลดลง รวมไปถึงระยะ at extensions ที่ลดลงด้วย โดยตัวอย่างที่ 10 ซึ่งมีสัดส่วนผงกราไฟท์เพียง 5% มีค่า compressive strength และค่า max load เท่ากับ 10.63 เมกกะปาสกาลและ 7,140 นิวตัน ตามลำดับ ในขณะที่ ตัวอย่างที่ 13 ที่มีสัดส่วนผงกราไฟท์ 20% จะมีค่าคุณสมบัติทางกลศาสตร์ทั้งสอง 8.27 เมกกะปาสกาลและ 5,558 นิวตัน ตามลำดับเท่านั้น

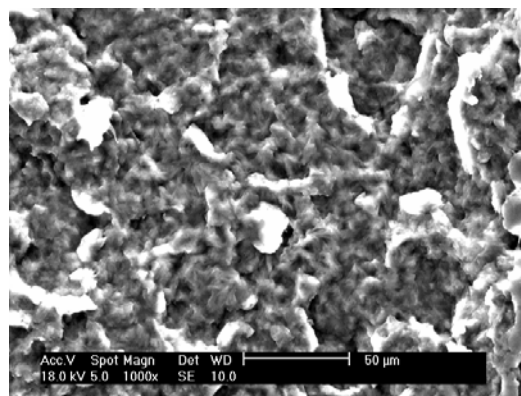
และจากลักษณะการแตกหักของผลิตภัณฑ์ในภาพที่ 87 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงกราไฟท์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีการแตกหักที่ละเอียดขึ้นอีกด้วย ซึ่งทั้งหมดนี้เนื่องมาจากผลกระทบของสัดส่วนผงกราไฟท์ที่เพิ่มขึ้น และสัดส่วนของโครงสร้างพอลิเมอร์ที่ลดลง จึงทำให้คุณสมบัติด้านกลศาสตร์ของผลิตภัณฑ์ลดลง

7. การศึกษาการทดสอบถ่ายภาพ SEM (Scanning Electron Microscope)

การทดสอบนี้จะทำการถ่ายภาพ SEM ผลิตภัณฑ์ shape stabilized PCM ทั้ง 3 ชุดการทดลอง ซึ่งเลือกมาถ่ายภาพ SEM ชุดการทดลองตัวอย่าง โดยเครื่อง SEM ยี่ห้อ PHILIPS รุ่น XL30 โดยผลการถ่ายภาพแสดงดังภาพที่ 88 ถึง 90



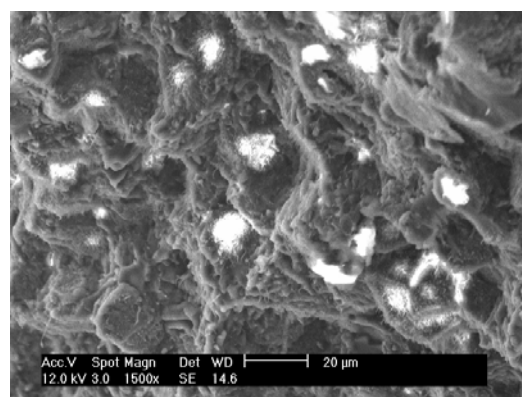
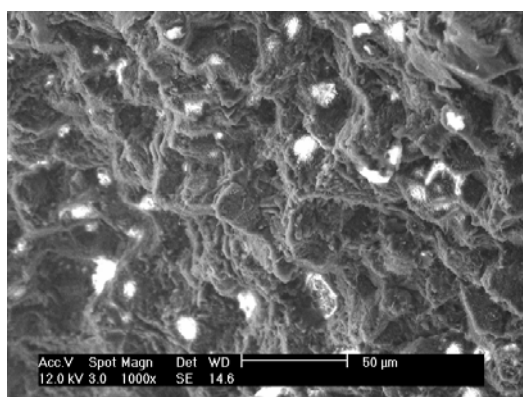
(a) ภาพกำลังขยาย 500 เท่า



(b) ภาพกำลังขยาย 1,000 เท่า

ภาพที่ 88 ภาพถ่าย SEM ชุดการทดลองที่ 1 ตัวอย่างที่ 2 (พาราฟิน/HDPE)

ภาพที่ 88 แสดงภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างที่ 2 ในชุดการทดลองที่ 1 ซึ่งมีสัดส่วนจีซีพาร์ราฟินต่อ HDPE เท่ากับ 60 ต่อ 40 ซึ่งจากภาพแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างพอลิเมอร์ HDPE ที่มีจีซีพาร์ราฟินกระจายตัวอยู่อย่างเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous)

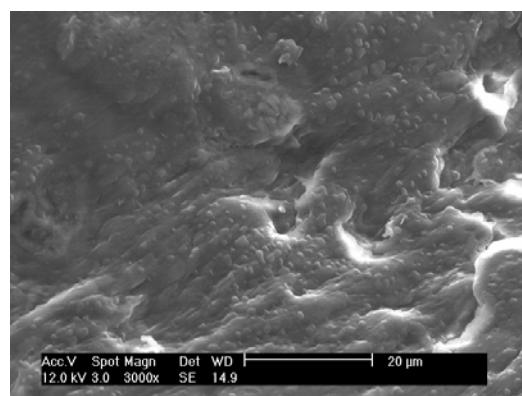
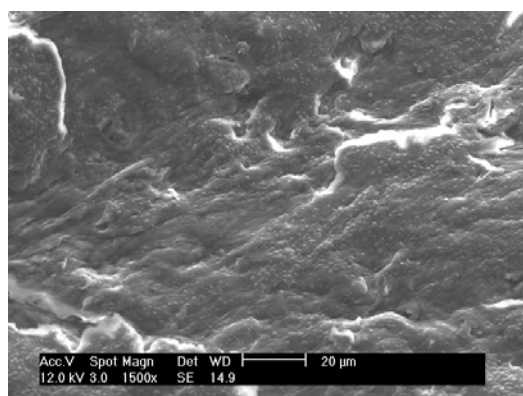


(a) ภาพกำลังขยาย 1,000 เท่า

(b) ภาพกำลังขยาย 1,500 เท่า

ภาพที่ 89 ภาพถ่าย SEM ชุดการทดลองที่ 2 ตัวอย่างที่ 6 (พาราฟิน/LDPE/EVA)

ภาพที่ 89 แสดงภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างที่ 6 ซึ่งมีสัดส่วน จี๊ฟี่พาราฟิน : LDPE : EVA เท่ากับ 55 : 30 : 15 โดยภาพแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างพอลิเมอร์ที่มีจี๊ฟี่พาราฟินกระจายตัวอยู่ และจุดสีขาวเป็นบริเวณ charging หรือบริเวณที่มีอิเล็กตรอนรวมตัวกันอยู่



(a) ภาพกำลังขยาย 1,500 เท่า

(b) ภาพกำลังขยาย 3,000 เท่า

ภาพที่ 90 ภาพถ่าย SEM ชุดการทดลองที่ 3 ตัวอย่างที่ 12 (พาราฟิน/LDPE/EVA/ผงกราไฟท์)

ภาพที่ 90 แสดงภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างที่ 12 ซึ่งมีสัดส่วน จี๊ฟี่พาราฟิน : LDPE : EVA : ผงกราไฟท์ เท่ากับ 55 : 25 : 10 : 10 โดยภาพแสดงถึงโครงสร้างพอลิเมอร์ที่มีจี๊ฟี่พาราฟินกระจายตัวอยู่ และจากภาพที่ 90 (b) ซึ่งมีกำลังขยายภาพ 3,000 เท่าจะสังเกตเห็นผงกราไฟท์กระจายตัวอยู่ระหว่างโครงสร้างพอลิเมอร์จำนวนมาก

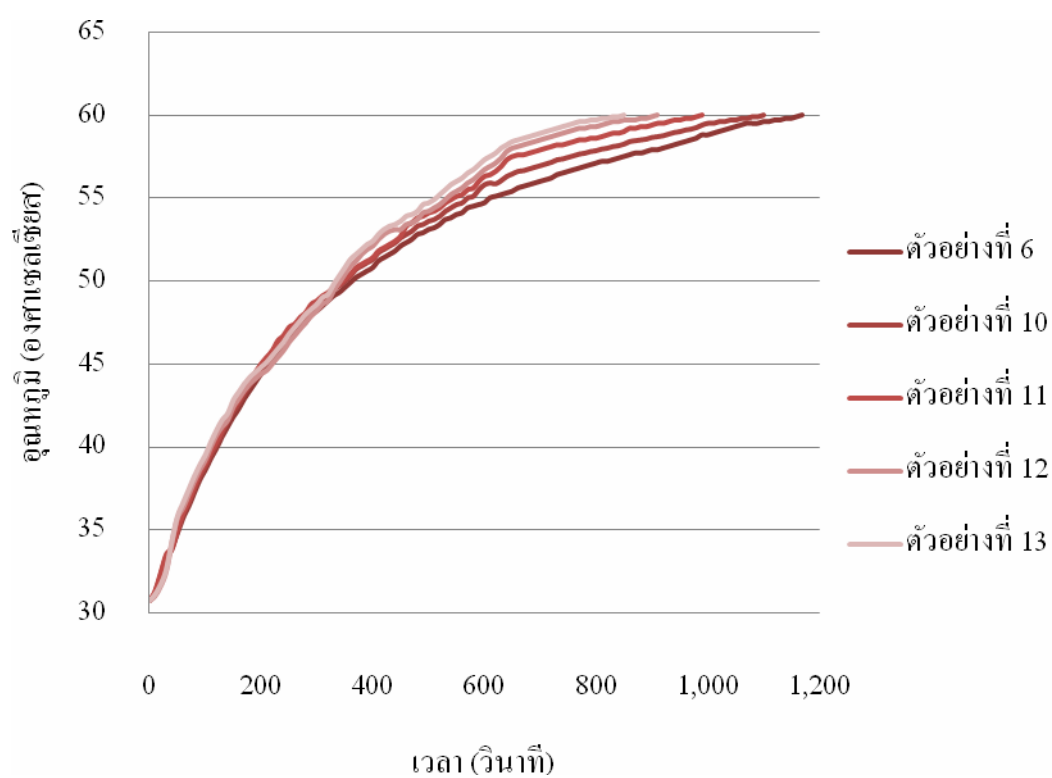
8. การศึกษาการทดสอบค่าความนำความร้อน (Thermal conductivity) และ การศึกษาค่า Heating และ Cooling Curve

shape stabilized PCM ชุดที่ 3 และตัวอย่างที่ 6 ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนปริมาณผงกราฟไฟท์ในผลิตภัณฑ์ จะถูกนำมาทดสอบหาความนำความร้อนโดยเครื่องทดสอบค่าความนำความร้อน ยี่ห้อ Hot disk เพื่อศึกษาถึงค่าปริมาณผงกราฟไฟท์ที่มีผลต่อสมบัติความนำความร้อนของผลิตภัณฑ์

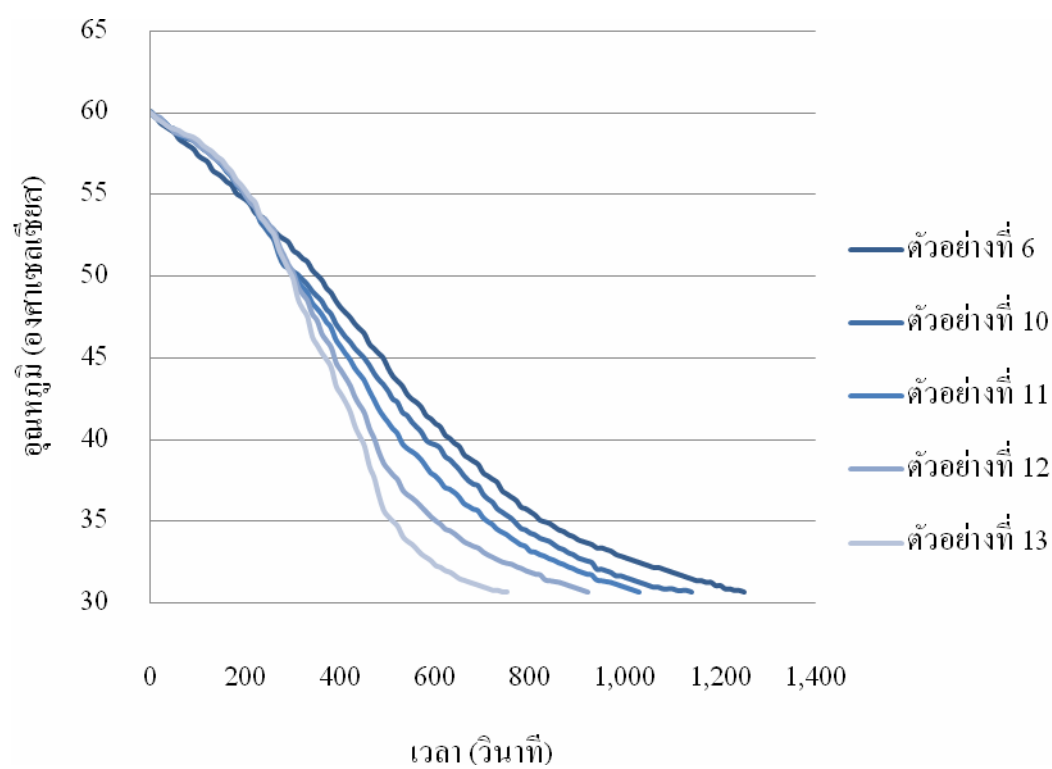
สำหรับการศึกษาค่า heating และ cooling curve และการทดสอบค่าความนำความร้อนนั้น ตัวอย่างในชุดที่ 3 และตัวอย่างที่ 6 จะถูกนำมาทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางความร้อนที่เปลี่ยนไปจากการเพิ่มปริมาณผงกราฟไฟท์ในผลิตภัณฑ์ โดยการทดสอบ heating และ cooling curve เริ่มโดยนำชิ้นงานที่มีเทอร์โมมิเตอร์เสียบอยู่ไปแช่ในเครื่อง water bath ที่มีน้ำอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และรอจนอ่านค่าอุณหภูมิเทอร์โมมิเตอร์ได้ 30 องศาเซลเซียส แล้วย้ายชิ้นงานไปยังเครื่อง Water bath ที่มีน้ำอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เริ่มบันทึกเมื่ออุณหภูมิ 30.7 องศาเซลเซียส และบันทึกอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ทุก 10 วินาที จนอุณหภูมิชิ้นงานเพิ่มขึ้นเป็น 60 องศาเซลเซียส จากนั้นรีบย้ายชุดชิ้นงานไปยังเครื่อง water bath ที่มีน้ำอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส บันทึกอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ทุก 10 วินาที จนอุณหภูมิชิ้นงานลดลงเป็น 30.7 องศาเซลเซียส นำค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในชิ้นงานและเวลามาพล็อตกราฟ heating และ cooling curve โดยผลการทดสอบค่าความนำความร้อนและ heating และ cooling curve แสดงดังตารางที่ 29 และ 30 กับภาพที่ 91 และ 92

ตารางที่ 29 ค่าความนำความร้อนของตัวอย่างชุดที่ 3 และตัวอย่างที่ 6

ตัวอย่าง	พาราฟิน	LDPE	EVA	ผงกราฟไฟท์	ค่าความนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)	เปอร์เซ็นต์การปรับปรุง (%)
6	55	30	15	0	0.283	0
10	55	27	13	5	0.312	10.25
11	55	25	10	10	0.357	26.15
12	55	20	10	15	0.428	51.24
13	55	15	10	20	0.505	78.44



ภาพที่ 91 Heating curve ของชุดการทดลองที่ 3 และตัวอย่างที่ 6



ภาพที่ 92 Cooling curve ของชุดการทดลองที่ 3 และตัวอย่างที่ 6

ตารางที่ 30 ค่า Heating และ Cooling curve ของชุดการทดลองที่ 3 และตัวอย่างที่ 6

ตัวอย่าง	พาราฟิน	LDPE	EVA	ผงกราฟไฟท์	Heating time (วินาที)	Cooling time (วินาที)
6	55	30	15	0	1,170	1,250
10	55	27	13	5	1,100	1,140
11	55	25	10	10	990	1,030
12	55	20	10	15	910	920
13	55	15	10	20	840	750

จากตารางที่ 29 จะเห็นได้ชัดเจนว่าปริมาณผงกราฟไฟท์ส่งผลต่อค่าความนำความร้อนของผลิตภัณฑ์อย่างมาก โดยเปรียบเทียบได้จากตัวอย่างที่ 6 ซึ่งไม่มีปริมาณผงกราฟไฟท์ในตัวอย่างเลยมีค่าความนำความร้อนเพียง 0.28 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน แต่สำหรับตัวอย่างที่ 13 ซึ่งมีปริมาณผงกราฟไฟท์ถึง 20% นั้นมีค่าความนำความร้อนที่เพิ่มขึ้นถึง 0.505 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ปรับปรุงถึง 74.88%

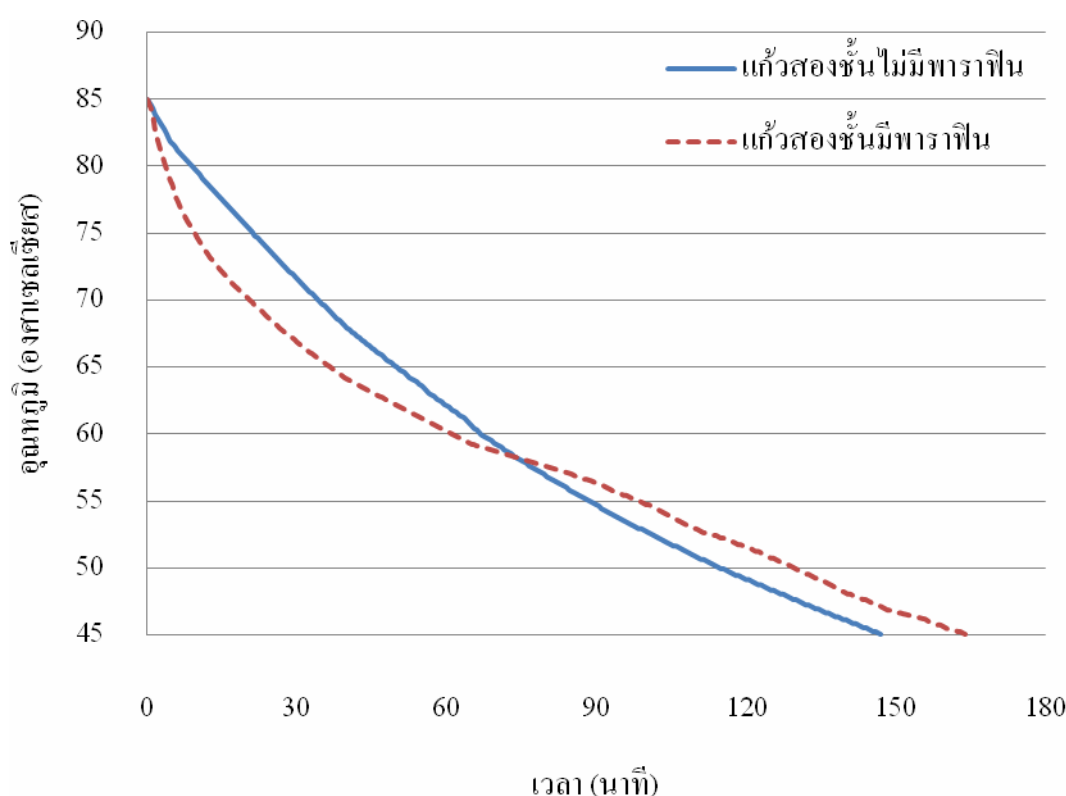
สำหรับ heating และ cooling curve ในภาพที่ 91 และ 92 กับตารางที่ 30 นั้นจะเห็นได้ว่ากรณี heating curve นั้น เมื่อเพิ่มปริมาณผงกราฟไฟท์ในตัวอย่างทำให้ผลิตภัณฑ์ได้มีการนำความร้อนที่ดีขึ้นตามปริมาณของผงกราฟไฟท์ที่เพิ่มขึ้น โดยในตัวอย่างที่ 6 ซึ่งไม่มีผงกราฟไฟท์ในส่วนประกอบจะใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิจาก 30.7 องศาเซลเซียสถึง 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลาถึง 1,170 วินาที แต่สำหรับตัวอย่างที่ 13 ซึ่งมีปริมาณผงกราฟไฟท์ 20% นั้นใช้เวลาเพียง 840 วินาทีเท่านั้น และสำหรับกรณี cooling curve นั้นตัวอย่างที่มีปริมาณผงกราฟไฟท์มากกว่าจะมีค่าความนำความร้อนที่ดีกว่าเช่นเดียวกัน สังเกตได้จากการลดลงของอุณหภูมิภายในตัวอย่างที่เร็วกว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของบรรยากาศภายนอก โดยในตัวอย่างที่ 6 ซึ่งไม่มีผงกราฟไฟท์ในส่วนประกอบจะใช้เวลาในการลดอุณหภูมิจาก 65 องศาเซลเซียสถึง 30.7 องศาเซลเซียส เป็นเวลาถึง 1,250 วินาที แต่สำหรับตัวอย่างที่ 13 ซึ่งมีปริมาณผงกราฟไฟท์ 20% นั้นใช้เวลาเพียง 750 วินาที

จากผลการทดสอบนี้ จึงกล่าวได้ว่าปริมาณผงกราฟไฟท์ในตัวอย่างมีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางความร้อนในด้านความนำความร้อนอย่างชัดเจน เนื่องจากผงกราฟไฟท์มีสมบัติความนำความร้อนที่ดี เมื่อนำมาเป็นส่วนผสมใน shape stabilized PCM จึงเพิ่มค่าความนำความร้อนให้ตัวอย่างด้วย ซึ่งสามารถแก้ปัญหาหลักของ shape stabilized PCM ด้านค่าความนำความร้อน อันเนื่องมาจาก

ส่วนผสมซึ่งมีเพียงซีฟิงพาราฟินและพอลิเมอร์ ซึ่งส่วนประกอบทั้งสองอย่างมีค่าความนำความร้อนที่ต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณผงกราไฟท์ก็มีข้อเสีย เนื่องจากทำให้คุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ลดลงเช่นกัน ดังที่ได้กล่าวมาในการทดลองรอบการใช้งาน 20 รอบและการทดสอบแรงกดในหัวข้อที่ 3 และ 6.3 ตามลำดับ ดังนั้นการเลือกปริมาณผงกราไฟท์ในการนำไปใช้งานจึงควรเลือกปริมาณให้เหมาะสมกับงานที่นำไปประยุกต์ใช้ โดยคำนึงถึงทั้งคุณสมบัติด้านความร้อนและคุณสมบัติด้านกลศาสตร์

9. การศึกษาการทดสอบแก๊วสองชั้น

การทดลองที่ 2 แก๊วทดสอบสองชั้นจะถูกนำมาทดสอบหาค่าการเปลี่ยนแปลงการลดอุณหภูมิของน้ำภายในแก๊วทดสอบ โดยเปรียบเทียบระหว่างสองแก๊ว ซึ่งแก๊วสองชั้นทั้งสองอันมีลักษณะเหมือนกันทุกประการดังภาพที่ 45 ถึง 47 แก๊วทั้งสองต่างกันว่าแก๊วใบแรกจะมีอากาศอยู่ระหว่างชั้นของแก๊วทั้งสอง แต่สำหรับแก๊วใบที่สองนั้นบรรจุซีฟิงพาราฟินขนาด 90 กรัมอยู่ระหว่างชั้นของแก๊วทั้งสอง จากนั้นนำน้ำที่มีอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ปริมาณ 350 กรัม มาเทใส่ในแก๊วสองชั้นที่วางบนที่รองแก้วโดยใช้ที่คิบบีกเกอร์ แล้วทำการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิของน้ำในแก๊วทุก 30 วินาทีและบันทึก และนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ได้ดังภาพที่ 93 และตารางที่ 31



ภาพที่ 93 กราฟการลดอุณหภูมิของแกวสองชั้นสองแบบ

ภาพที่ 93 แสดงลักษณะกราฟการลดอุณหภูมิของแกวสองชั้นที่มีจีฟี่พาราฟินบรรจุและไม่มีจีฟี่พาราฟินบรรจุระหว่างชั้นของแกว โดยจากกราฟพบว่าลักษณะการลดอุณหภูมิของน้ำในแกวในช่วงแรกตั้งแต่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิประมาณ 65 องศาเซลเซียส น้ำในแกวสองชั้นภายในเป็นจีฟี่พาราฟินมีการลดอุณหภูมิลดอย่างรวดเร็ว ในขณะที่แกวสองชั้นภายในเป็นอากาศหรือไม่มีจีฟี่พาราฟินบรรจุอยู่มีลักษณะการลดอุณหภูมิลดช้ากว่าแกวสองชั้นภายในเป็นจีฟี่พาราฟิน ซึ่งผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าจีฟี่พาราฟินมีการดูดและสะสมพลังงานความร้อนจากน้ำภายในแกว โดยกระบวนการดูดความร้อนเกิดขึ้นในช่วงการเปลี่ยนสถานะของจีฟี่พาราฟินจากของแข็งไปเป็นของเหลว และมีการดูดพลังงานความร้อนไปใช้ในการเปลี่ยนสถานะในรูปของความร้อนแฝง ซึ่งเกิดขึ้นในขั้นตอนแรกที่ใส่น้ำร้อนลงไปในแกวสองชั้น และการที่วัสดุชั้นในของแกวทำจากโลหะช่วยในการถ่ายเทความร้อนที่ดี ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บพลังงานของจีฟี่พาราฟิน

เมื่อพิจารณาน้ำในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 65 องศาเซลเซียสลงไป พบว่าน้ำในแกวทดลองสองชั้นภายในไม่มีจีฟี่พาราฟินหรือเป็นอากาศมีลักษณะการลดอุณหภูมิลดอย่างปกติ ในขณะที่แกว

สองชั้นภายในเป็นฉีฉีพาราฟินเริ่มมีแนวโน้มที่จะรักษาอุณหภูมิของน้ำในแก้วได้ดีกว่าแก้วสองชั้นภายในเป็นอากาศเนื่องจากการส่งความร้อนกลับของฉีฉีพาราฟินสู่น้ำในแก้ว โดยการที่ฉีฉีพาราฟินเปลี่ยนสถานะกลับจากของเหลวไปเป็นของแข็ง และมีการคายความร้อนในรูปของความร้อนแฝงออกมา ซึ่งแก้วที่ไม่มีฉีฉีพาราฟินบรรจุอยู่ไม่มีพลังงานสะสมดังกล่าวจึงทำให้การสูญเสียพลังงานความร้อนออกอย่างเดียว อุณหภูมิของน้ำในแก้วจึงลดลงเร็วกว่า โดยแก้วสองชั้นที่มีฉีฉีพาราฟินบรรจุอยู่ระหว่างชั้นใช้เวลาในการลดอุณหภูมิของน้ำร้อนภายในแก้วจาก 85 ถึง 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลาถึง 164 นาที ในขณะที่แก้วสองชั้นภายในระหว่างชั้นไม่มีฉีฉีพาราฟินหรือเป็นอากาศใช้เวลา 147 นาที ซึ่งแตกต่างกันถึง 17 นาที

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการผลิต shape stabilized PCM โดยใช้ขี้ผึ้งพาราฟินเป็นสาร PCM หลัก และให้ขี้ผึ้งพาราฟินสร้างเฟสการกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์ โดยทำการศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณของพอลิเมอร์ รวมถึงปริมาณของผงกราฟไฟท์ในระหว่างขั้นตอนการผลิตที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางความร้อนและคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของผลิตภัณฑ์ สามารถสรุปผลการทดลองของการทดลองที่ 1 ทั้ง 3 ชุดได้ดังต่อไปนี้

- จากกราฟ DSC ที่ได้แสดงให้เห็นว่าไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างสารทั้งหมด ไม่มีสารใหม่เกิดขึ้น แต่สารที่ได้เป็นสารประกอบที่มาจากสารตั้งต้นทั้งหมด โดยคุณสมบัติด้านความร้อนต่างๆ จะเป็นการรวมคุณสมบัติของขี้ผึ้งพาราฟินและพอลิเมอร์ที่เป็นส่วนผสม

- จากกรณีการทดลองชุดที่ 1 ซึ่งเป็นการปรับเปลี่ยนสัดส่วนขี้ผึ้งพาราฟินกับ HDPE นั้น พบว่าการเพิ่มสัดส่วนของ HDPE หรือลดปริมาณของขี้ผึ้งพาราฟินนั้นจะมีผลทำให้คุณสมบัติทางความร้อนด้านความร้อนแฝงของผลิตภัณฑ์ลดลง ซึ่งมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์สามารถเก็บสะสมพลังงานความร้อนได้ลดลง และหมายถึงประสิทธิภาพด้านความร้อนที่ลดลงด้วย แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์นั้น ก็แสดงให้เห็นว่าการที่มีสัดส่วนของ HDPE อยู่มากก็ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแข็งแรงและความคงทนต่อรอบการใช้งานมากกว่าเช่นเดียวกัน แม้ว่าผลิตภัณฑ์ในชุดนี้จะมี ความคงทนต่อรอบการใช้งานที่สูงอยู่แล้วเนื่องจากจุดหลอมเหลวที่ห่างกันอย่างมากของขี้ผึ้งพาราฟินและ HDPE ก็ตาม ดังนั้นการเลือกผลิตภัณฑ์ในตัวอย่างชุดนี้ไปใช้งานก็สามารถเลือกได้ว่างานที่จะนำผลิตภัณฑ์ไปประยุกต์ใช้นั้นต้องการเน้นที่คุณสมบัติด้านใด

- จากกรณีการทดลองชุดที่ 2 ซึ่งเป็นการปรับเปลี่ยนสัดส่วน LDPE และ EVA โดยมีปริมาณของขี้ผึ้งพาราฟินคงที่ พบว่าการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของ LDPE และ EVA นั้นไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติทางความร้อนด้านความร้อนแฝงนักเนื่องมาจากปริมาณของขี้ผึ้งพาราฟินในตัวอย่างที่เท่ากัน แต่จะส่งผลต่อคุณสมบัติด้านกลศาสตร์ซึ่งคือความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์และความคงทนต่อรอบการใช้งานมากกว่า โดยถ้าเพิ่มสัดส่วนของ EVA นั้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความคงทนต่อรอบการใช้งานมากขึ้น โดยที่ผลิตภัณฑ์จะไม่แตกร้าวที่ผิวเมื่อผ่านรอบการใช้งาน แม้อาจมีขี้ผึ้งพาราฟินรั่วไหลออกมาบ้างเล็กน้อย เนื่องมาจากจุดหลอมเหลวที่ใกล้เคียงกันของ

โคพอลิเมอร์และซีฟี่พาราฟิน และจากผลการทดสอบแรงกดก็แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนของ EVA ที่เพิ่มขึ้นนั้นก็ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติด้านกลศาสตร์ที่ดีขึ้นด้วย โดยชิ้นงานจะไม่แข็งเปราะ และแตกหักง่ายเหมือนกรณีที่มีปริมาณ EVA น้อย อย่างไรก็ตามไม่สามารถบอกได้ว่าตัวอย่างไหนดีที่สุด เนื่องจากแต่ละตัวอย่างนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะของงานที่แตกต่างกันได้

- จากกรณีชุดการทดลองที่ 3 ซึ่งเป็นการปรับเปลี่ยนสัดส่วน LDPE EVA และผงกราฟไฟ โดยมีปริมาณของซีฟี่พาราฟินคงที่ พบว่าการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของ LDPE EVA และผงกราฟไฟนั้นไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติทางความร้อนด้านความร้อนแฝงนัก โดยเนื่องมาจากปริมาณของซีฟี่พาราฟินในตัวอย่างที่เท่ากัน แต่จะส่งผลถึงคุณสมบัติทางความร้อนด้านความนำความร้อนโดยตรง เนื่องจากผงกราฟไฟนั้นมีค่าความนำความร้อนสูง เมื่อนำมาเป็นส่วนผสมกับผลิตภัณฑ์ จึงทำให้ตัวอย่างที่มีสัดส่วนของผงกราฟไฟสูงนั้น จึงมีค่าความนำความร้อนที่สูงขึ้นด้วย ซึ่งการใช้งานบางประเภทของ shape stabilized PCM นั้น ต้องการค่าความนำความร้อนที่สูง เนื่องจากต้องการความรวดเร็วในการถ่ายเทความร้อน เช่น เลือกันหนาวของนักสกี เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณสัดส่วนของผงกราฟไฟในตัวอย่างนั้น ก็ทำให้ความคงทนต่อการใช้งานลดลงอย่างเห็นได้ชัด และคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างชัดเจนเช่นเดียวกัน โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความแข็งแรงลดลง แตกหักง่ายขึ้น

- สำหรับการทดลองที่ 2 ซึ่งเป็นการทดลองการประยุกต์ใช้งานของ PCM ในแก้วสองชั้น พบว่าแก้วสองชั้นที่มีซีฟี่พาราฟินบรรจุอยู่ 90 กรัม ระหว่างชั้นมีผลให้สามารถลดอุณหภูมิของน้ำจาก 85 องศาเซลเซียส ลงมาที่ 65 องศาเซลเซียสได้เร็วกว่า และสามารถรักษาอุณหภูมิของน้ำให้อยู่ในช่วง 65-45 องศาเซลเซียสได้นานกว่าแก้วสองชั้นที่ไม่มีซีฟี่พาราฟินบรรจุอยู่ระหว่างชั้น เนื่องมาจากแก้วที่มีซีฟี่พาราฟินบรรจุอยู่ระหว่างชั้นมีการเก็บสะสมพลังงานความร้อนในรูปความร้อนแฝงเมื่อซีฟี่พาราฟินเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลวในช่วงเวลาที่อุณหภูมิของน้ำในแก้วทดลองสูงกว่าจุดหลอมเหลวของซีฟี่พาราฟิน และซีฟี่พาราฟินคายความร้อนแฝงออกมาคืนสู่น้ำภายในแก้วทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะกลับจากของเหลวกลับมาเป็นของแข็งในช่วงเวลาที่อุณหภูมิของน้ำในแก้วทดลองต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของซีฟี่พาราฟิน

ข้อเสนอแนะ

- จากกราฟ DSC การทดลองที่ 1 ชุดที่ 1 ถึง 3 จะเห็นว่ากราฟที่ได้ไม่แสดงถึง base line และพีค (peak) การหลอมละลายของจีฟี่พาราฟิน LDPE และ EVA มีการทับซ้อน (overlap) กัน โดยเฉพาะกรณีจีฟี่พาราฟินและ EVA ซึ่งทำให้ไม่สามารถหาค่าความร้อนและค่าความร้อนแฝงของจีฟี่พาราฟินในตัวอย่างได้อย่างแม่นยำได้ ซึ่งมาจากสาเหตุหลักสองประการ อย่างแรกคือการใช้ค่าการเพิ่มอุณหภูมิ (heating rate) ที่เร็วไปของเครื่อง DSC โดยในการทดลองใช้ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งเป็นค่าที่ถือว่าให้ผลค่อนข้างละเอียดในกรณีทั่วไป แต่เครื่อง DSC ที่ใช้ทดลองนั้นเหมาะกับค่าการเพิ่มอุณหภูมิเพียง 1 องศาเซลเซียสต่อนาทีเท่านั้น ประการที่สองคือพอลิเมอร์ที่ใช้ทั้ง 3 ชนิด นั้นมีอุณหภูมิหลอมละลายที่ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ผู้วิจัยจึงแนะนำให้เลือกใช้พอลิเมอร์ที่มีจุดหลอมเหลวต่างกันอย่างชัดเจน หรืออาจใช้ HDPE แทน LDPE ในการทดลองชุดที่ 2 ซึ่งการใช้พอลิเมอร์ที่มีจุดหลอมเหลวสูงนั้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้ผลิตภัณฑ์ทั้งในด้านคุณสมบัติความร้อน ความคงทนต่อรอบการใช้งานและด้านกลศาสตร์อีกด้วย

- ในการทดลองที่ 1 ชุดที่ 2 ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ LDPE และ EVA ในขณะที่ปริมาณจีฟี่พาราฟินคงที่นั้น จะเห็นได้ว่าในตัวอย่างที่มีปริมาณ EVA มากถึงแม้จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกลศาสตร์ให้ดีขึ้น แต่ก็ยังมีการรั่วไหลของจีฟี่พาราฟินในการทดลองรอบการใช้งาน เนื่องมาจากจุดหลอมเหลวที่ต่ำและใกล้เคียงกับจีฟี่พาราฟินของ EVA ผู้วิจัยจึงแนะนำให้เลือกหาโคพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีจุดหลอมเหลวสูงและห่างกับจีฟี่พาราฟินมากกว่านี้ โดยเพื่อประสิทธิภาพด้านกลศาสตร์และความคงทนต่อรอบการใช้งานที่ดีขึ้น

- ในการทดลองชุดที่ 3 ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนปริมาณผงกราฟไฟท์นั้น ในการทดลองใช้ LDPE และ EVA เป็นพอลิเมอร์ ซึ่งผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างพอลิเมอร์ HDPE มีความแข็งแรงและความคงทนต่อรอบการใช้งานมากกว่าโครงสร้างพอลิเมอร์ของ LDPE และ EVA ผู้วิจัยจึงแนะนำให้มีการใช้พอลิเมอร์ HDPE แทน LDPE และ EVA ในการทดลองชุดที่ 3

- ในการทดสอบความคงทนต่อรอบการใช้งานในงานวิจัยนี้ทดสอบเพียง 20 รอบเท่านั้น ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานจริงนั้นจะต้องใช้งานมากกว่า 100 รอบ โดยที่คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ควรจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักทั้งในด้านคุณสมบัติทางความร้อนและคุณสมบัติด้านกลศาสตร์ ผู้วิจัยจึงแนะนำให้มีการเพิ่มรอบของการทดสอบขึ้น และนำชิ้นงานไปทดสอบคุณสมบัติหลังรอบการใช้งาน ทั้งในด้านความร้อนโดยเครื่อง DSC และทดสอบแรงกดหลังรอบการใช้งานด้วย รวมไปถึง

ควรเพิ่มการทดสอบแรงกดผลิตภัณฑ์ในขณะที่ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิมากกว่าจุดหลอมเหลวของซีฟิงพาราฟินด้วย เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของผลิตภัณฑ์ขณะมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของซีฟิงพาราฟินในตัวอย่าง

- เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังไม่ผสมกันอย่างเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากขั้นตอนการปั่นผสมนั้น ผู้วิจัยจึงแนะนำว่าควรเพิ่มการศึกษาถึงผลของความเร็วรอบในการปั่นผสมขนาดของใบปั่นและระยะเวลาในการปั่นผสมด้วย เนื่องจากจะส่งผลโดยตรงต่อความเป็นเนื้อเดียวกันของผลิตภัณฑ์

- เนื่องจากในขั้นตอนการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC นั้นผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์เพียงครั้งเดียว จึงอาจมีค่าคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติทางความร้อนได้ จึงแนะนำให้มีการทดสอบวิเคราะห์สามครั้งต่อตัวอย่างและทำการหาค่าเฉลี่ย เพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นขณะทดลองได้

- เนื่องจากในขั้นตอนการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลร้อนด้วยเครื่องทดสอบแรงกดนั้น ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์เพียงครั้งเดียว จึงอาจมีค่าคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติทางกลได้ จึงแนะนำให้มีการทดสอบวิเคราะห์สามครั้งต่อตัวอย่างและทำการหาค่าเฉลี่ย เพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น ขณะทดลองได้

- ผู้วิจัยแนะนำให้มีการเพิ่มการผลิต (scale up) และนำมาขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการเก็บสะสมพลังงานความร้อนในรูปความร้อนแฝงของผลิตภัณฑ์ต่อการใช้งานจริง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Athienitis, A.K., C. Liu, D. Hawes, D. Banu and D. Feldman. 1997. Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage. **Build Environ.** 32: 405–410.
- 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.
- David, W. 2000. **Allanstime: Time Interval Metrology Enterprise**. PCM. Available Source: <http://allanstime.com/SolarHome/index.html#5>. January, 16, 2000.
- 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.
- 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.

- Hawladar, M.N., M.S.Uddin and H.J. Zhu. 2002. Encapsulated phase change materials for thermal energy storage: experiments and simulation. **Int J Energy Res.** 26: 159–71.
- Hong, Y. and G. Xin-shi. 2000. Preparation of Polyethylene-Paraffin Compound as a Form-Stable Solid-Liquid Phase Change Material, **Solar Energy Materials & Solar Cells.** 64: 37-44.
- 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.
- Kedl, R.J. and T.K. Stovall. 1989. Activities in support of the wax-impregnated wallboard concept. **U.S. Department of Energy: thermal energy storage researches activity review.** New Orleans, Louisiana, USA.
- Kissock, J.K., J.M. Hannig, T.I. Whitney and M.L. Drake. 1998. Testing and simulation of phase change wallboard for thermal storage in buildings. **Proceedings of 1998 International Solar Energy Conference,** New York, USA: 45–52.
- 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.
- Ma, F. and L. Jin. 1997. Improvement on the properties of energy-storing constructional material and optimization of the phase change temperature. **J Huazhong Univ Sci Technol.** 25: 82–85.
- Neeper, D.A. 1989. Potential benefits of distributed PCM thermal storage. In: Coleman MJ, editor. Proceedings of 14th National Passive Solar Conference. Denver, Colorado, USA: **American Solar Energy Society:** 283–288.

- Salyer, I.O., A.K. Sircar and A. Kumar. 1995. Advanced phase change materials technology: evaluation in lightweight solute hollow-core building blocks. **Proceedings of the 30th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference**, Orlando, FL, USA: 217–24.
- Salyer, I.O. and A.K. Sircar. 1996. Phase change materials for heating and cooling of residential buildings and other applications. **Proceedings of 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference**: 236–243.
- Shapiro, M. 1989. Development of the enthalpy storage materials, mixture of methyl stearate and methyl palmitate. **Subcontract report to Florida Solar Energy Center**.
- Tomlinson, J.J. and D.D. Heberle. 1990. Analysis of wallboard containing a phase change material. **Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference-IECEC_90**. Reno, NV, USA: 230–235.
- 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. ข้อมูลสมบัติทางความร้อนที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC ของผลิตภัณฑ์

ผลการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะ จุดหลอมเหลว และค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลวหรือของสารทั้งหมด รวมถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราไหลความร้อนและอุณหภูมิ โดยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ยี่ห้อ TA INSTRUMENT รุ่น SDT 2860 และใช้อัตราเพิ่มอุณหภูมิที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที แสดงดังนี้

ตารางผนวกที่ ก1 คุณสมบัติทางความร้อนของพาราฟินและ HDPE

ตัวอย่าง	ความจุความร้อนของแข็ง (จุดต่อกรัม องศาเซลเซียส)	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	ความร้อนแฝง (จุดต่อกรัม)	ความจุความร้อนของเหลว (จุดต่อกรัม องศาเซลเซียส)
พาราฟิน	4.530	64.74	173.50	2.967
HDPE	1.198	137.48	-	0.920

- หมายเหตุ 1. ใช้อัตราการเพิ่มความร้อน (heating rate) ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
2. ค่าความจุความร้อนเป็นค่าโดยประมาณเนื่องจากกราฟ DSC ที่ได้ไม่แสดง base line อย่างชัดเจน
3. ค่าความจุความร้อนของแข็งจีฟี่พาราฟินและ HDPE เป็นค่าเฉลี่ยในช่วงอุณหภูมิ 38-42 องศาเซลเซียส
4. ค่าความร้อนแฝงของจีฟี่พาราฟินอยู่ในช่วงประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส
5. ค่าความจุความร้อนของเหลวจีฟี่พาราฟินและ HDPE เป็นค่าเฉลี่ยในช่วงอุณหภูมิ 90-94 องศาเซลเซียส และ 176-180 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ตารางผนวกที่ ก2 ปริมาณสัดส่วนพาราฟินและ HDPE และคุณสมบัติทางความร้อนการ
ทดลองชุดที่ 1

ตัวอย่าง	พาราฟิน	HDPE	จุดหลอมเหลว พาราฟิน (องศาเซลเซียส)	จุดหลอมเหลว HDPE (องศาเซลเซียส)	ความร้อนแฝง (จูลต่อกรัม)
1	50	50	68.45	125.05	70.95
2	60	40	67.48	122.70	118.60
3	70	30	68.99	122.20	125.60
4	75	25	67.67	120.81	131.80

หมายเหตุ 1. ใช้อัตราการเพิ่มความร้อน (heating rate) ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
2. ค่าความร้อนแฝงเป็นของขี้ผึ้งพาราฟินในสารตัวอย่าง
3. ค่าความร้อนแฝงอยู่ในช่วงประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส

ตารางผนวกที่ ก3 คุณสมบัติทางความร้อนของพาราฟิน LDPE และ EVA

ตัวอย่าง	ความจุความร้อนของแข็ง (จูลต่อกรัมองศาเซลเซียส)	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	ความร้อนแฝง (จูลต่อกรัม)	ความจุความร้อนของเหลว (จูลต่อกรัมองศาเซลเซียส)
พาราฟิน	4.531	64.74	173.50	2.967
LDPE	2.188	105.19	-	1.866
EVA	1.856	90.29	-	0.921

หมายเหตุ 1. ใช้อัตราการเพิ่มความร้อน (heating rate) ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
2. ค่าความจุความร้อนเป็นค่าโดยประมาณเนื่องจากกราฟ DSC ที่ได้ไม่แสดง
base line อย่างชัดเจน
3. ค่าความจุความร้อนของแข็งขี้ผึ้งพาราฟิน LDPE และ EVA เป็นค่าเฉลี่ยในช่วง
อุณหภูมิ 38-42 องศาเซลเซียส 45-50 องศาเซลเซียส และ 45-50 องศาเซลเซียสตาม
ลำดับ
4. ค่าความร้อนแฝงของขี้ผึ้งพาราฟินอยู่ในช่วงประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส
5. ค่าความจุความร้อนของเหลวขี้ผึ้งพาราฟิน LDPE และ EVA เป็นค่าเฉลี่ยในช่วง
อุณหภูมิ 90-94 องศาเซลเซียส 135-140 องศาเซลเซียสและ 115-120 องศาเซลเซียส
ตามลำดับ

**ตารางผนวกที่ ก4 ปริมาณสัดส่วนพาราฟิน LDPE และ EVA และคุณสมบัติทางความร้อน
ของการทดลองชุดที่ 2**

ตัวอย่าง	พาราฟิน	LDPE	EVA	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	ความร้อนแฝง (จูลต่อกรัม)
5	55	45	0	66.73	95.46
6	55	30	15	67.68	104.10
7	55	22.5	22.5	66.41	110.30
8	55	15	30	68.02	98.63
9	55	0	45	66.72	-

หมายเหตุ 1. ใช้อัตราการเพิ่มความร้อน (heating rate) ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

2. จุดหลอมเหลวและค่าความร้อนแฝงโดยประมาณเป็นของจีฟี่งพาราฟินในสารตัวอย่าง
3. ค่าความร้อนแฝงอยู่ในช่วงประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น เนื่องจากกราฟ DSC มีการ overlap โดยค่าความร้อนแฝงของจีฟี่งพาราฟินที่ได้จะมีค่าความจุความร้อนของแข็งของพอลิเมอร์รวมอยู่ด้วย จึงทำให้หาค่าความร้อนแฝงของจีฟี่งพาราฟินเปล่าไม่ได้
4. ตัวอย่างที่ 9 ไม่สามารถหาค่าความร้อนแฝงได้ เนื่องจากกราฟ DSC มีการ overlap มากเกินไป

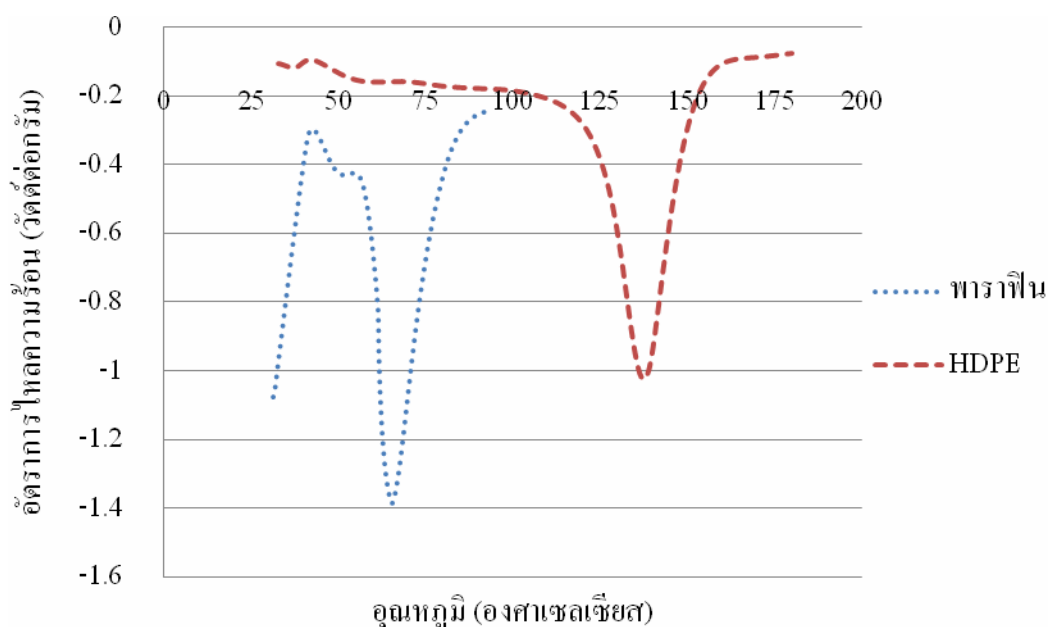
ตารางผนวกที่ ก5 ปริมาณสัดส่วนพาราฟิน LDPE EVA และผงกราไฟท์ และคุณสมบัติทางความร้อนของการทดลองชุดที่ 3

ตัวอย่าง	พาราฟิน	LDPE	EVA	ผงกราไฟท์	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	ความร้อนแฝง (จูลต่อกรัม)
10	55	27	13	5	68.13	94.54
11	55	25	10	10	66.63	102.50
12	55	20	10	15	66.72	100.70
13	55	15	10	20	67.18	108.40

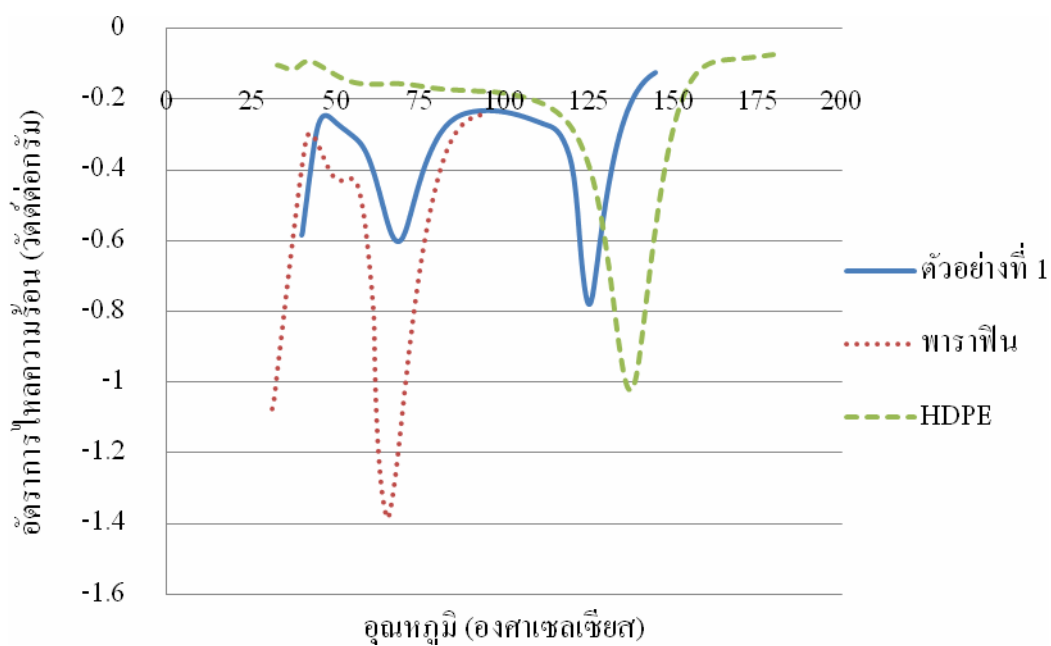
หมายเหตุ 1. ใช้อัตราการเพิ่มความร้อน (heating rate) ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

2. จุดหลอมเหลวและค่าความร้อนแฝงโดยประมาณเป็นของจีฟี่พาราฟินในสารตัวอย่าง

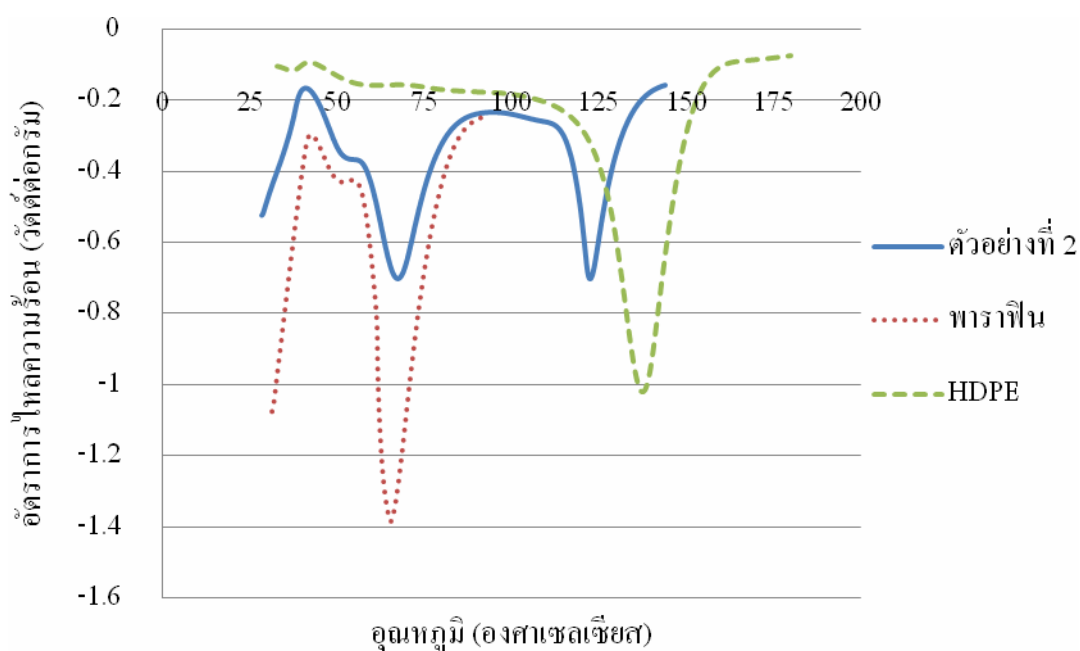
3. ค่าความร้อนแฝงอยู่ในช่วงประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น เนื่องจากกราฟ DSC มีการ overlap โดยค่าความร้อนแฝงของจีฟี่พาราฟินที่ได้จะมีค่าความจุความร้อนของแข็งของพอลิเมอร์รวมอยู่ด้วย จึงทำให้หาค่าความร้อนแฝงของจีฟี่พาราฟินเปล่าไม่ได้



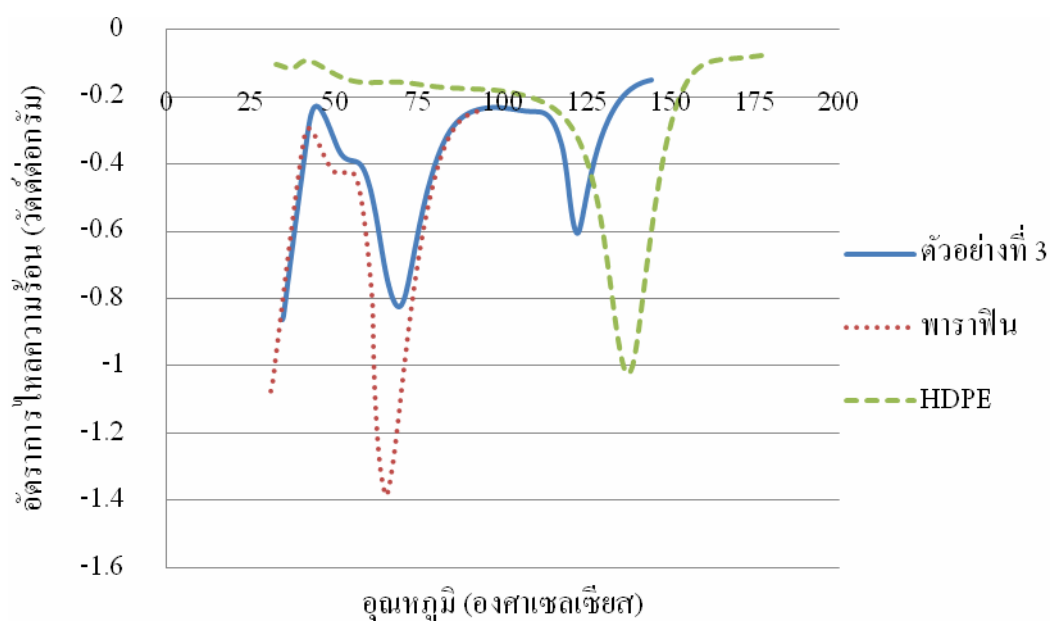
ภาพผนวกที่ ก1 กราฟ DSC ของพาราฟินและ HDPE



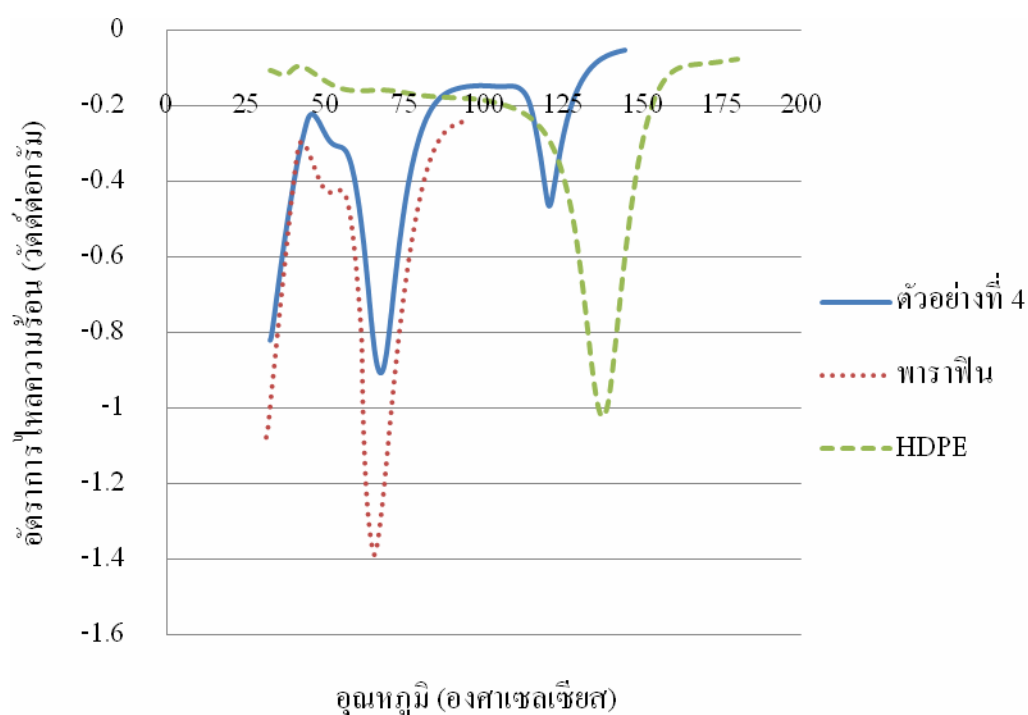
ภาพผนวกที่ ก2 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 1



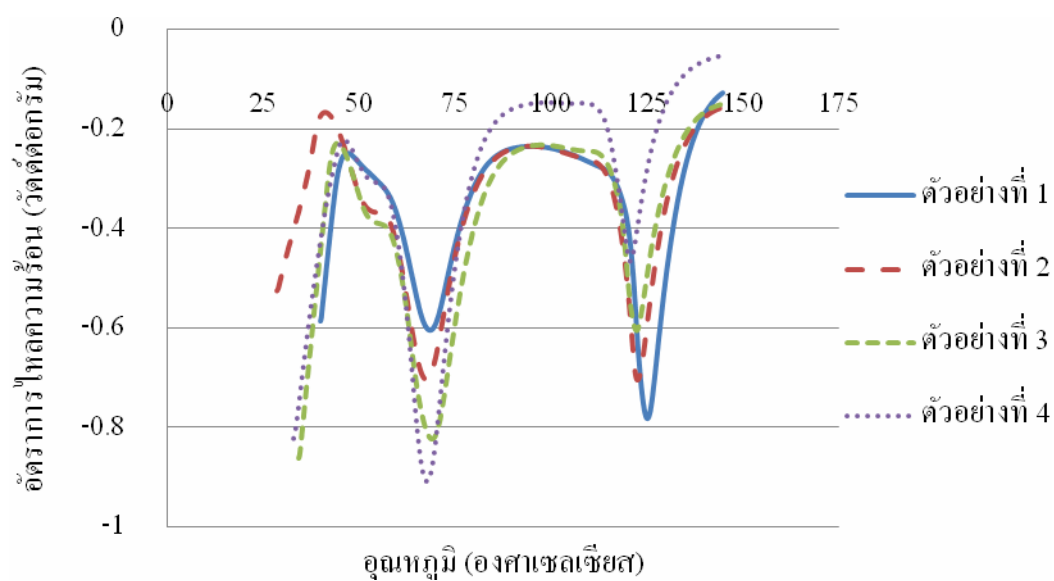
ภาพผนวกที่ ก3 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 2



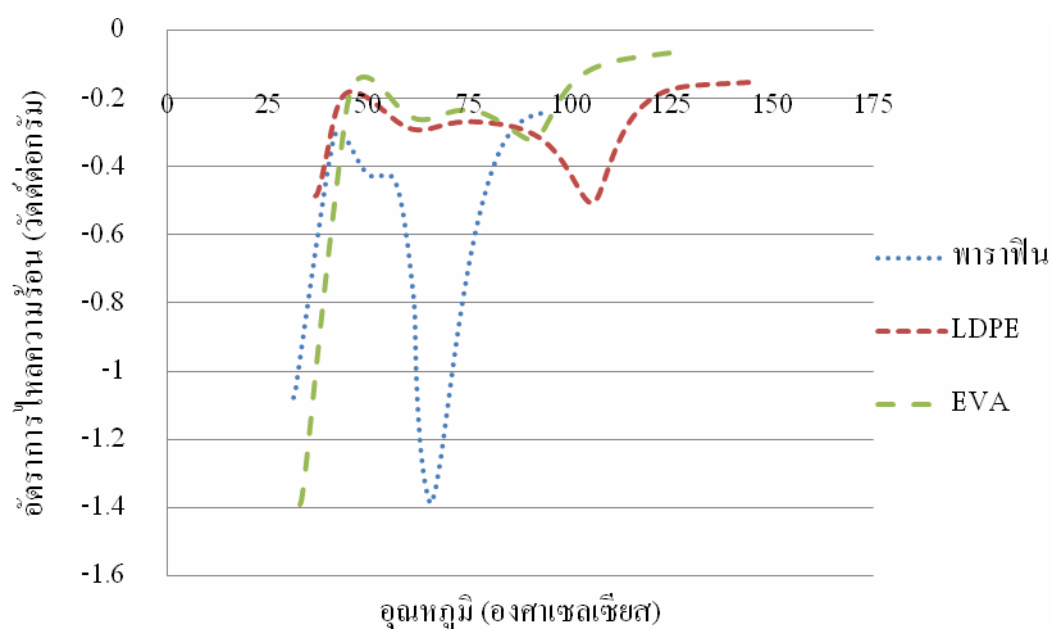
ภาพผนวกที่ ก4 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 3



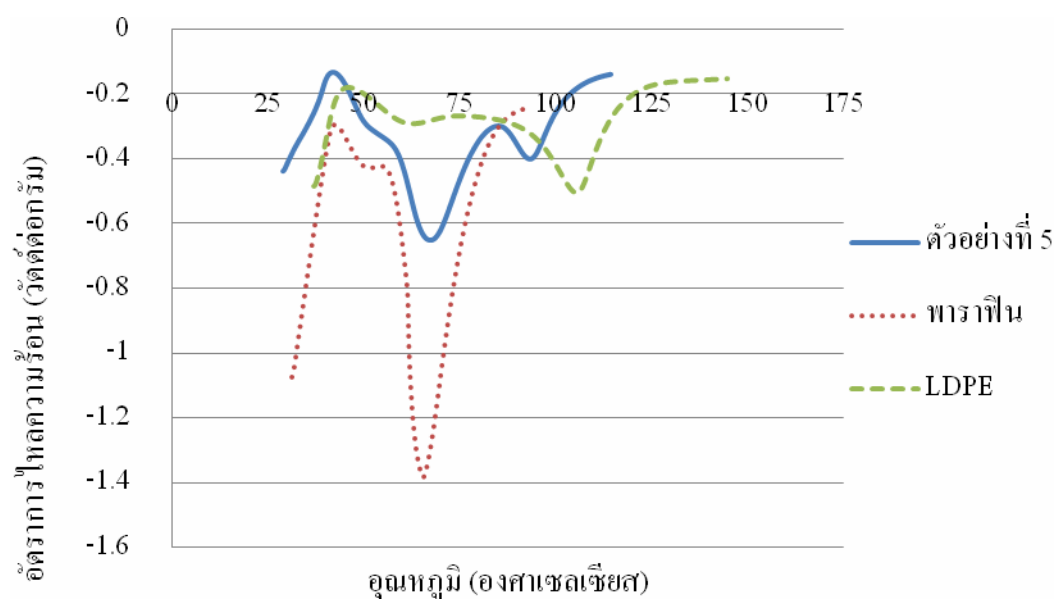
ภาพผนวกที่ ก5 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 4



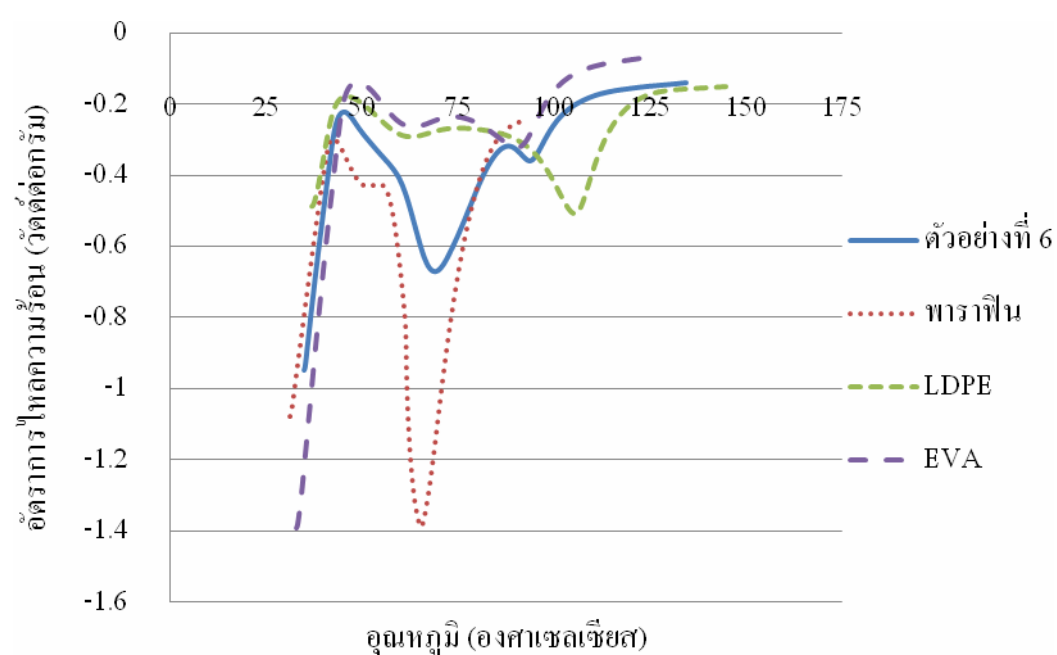
ภาพผนวกที่ 6 กราฟ DSC ของตัวอย่างชุดที่ 1



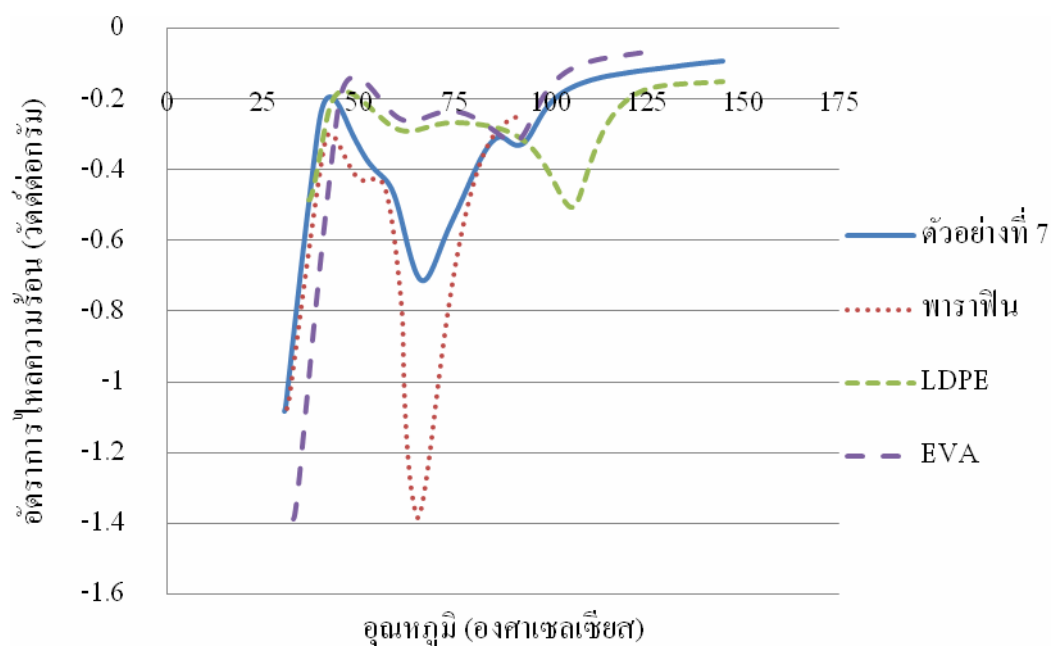
ภาพผนวกที่ 7 กราฟ DSC ของพาราฟิน LDPE และ EVA



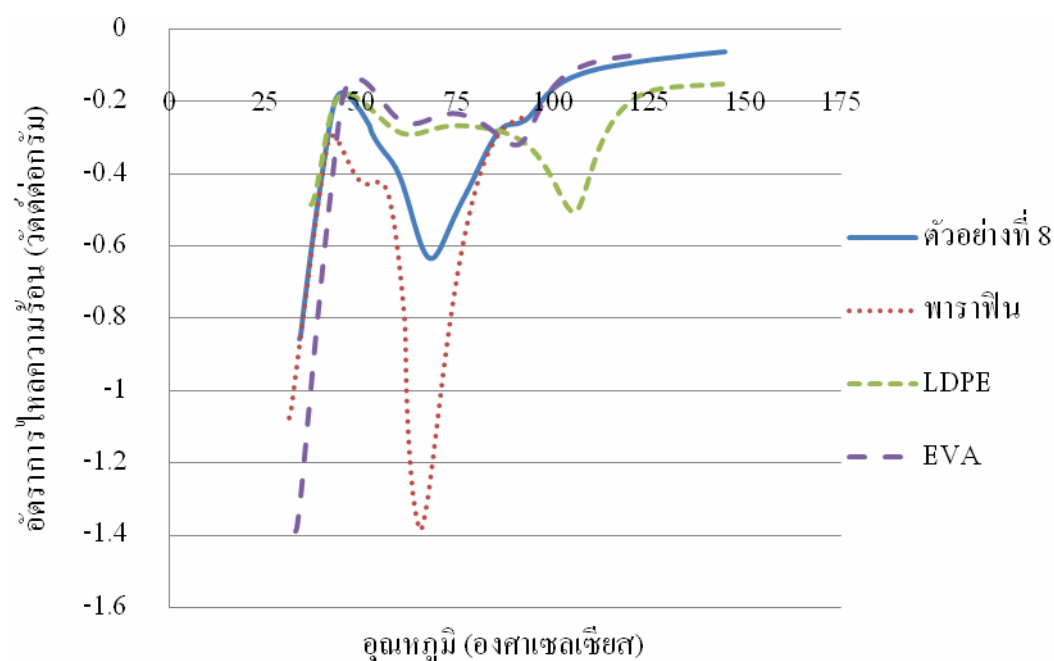
ภาพผนวกที่ ก8 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 5



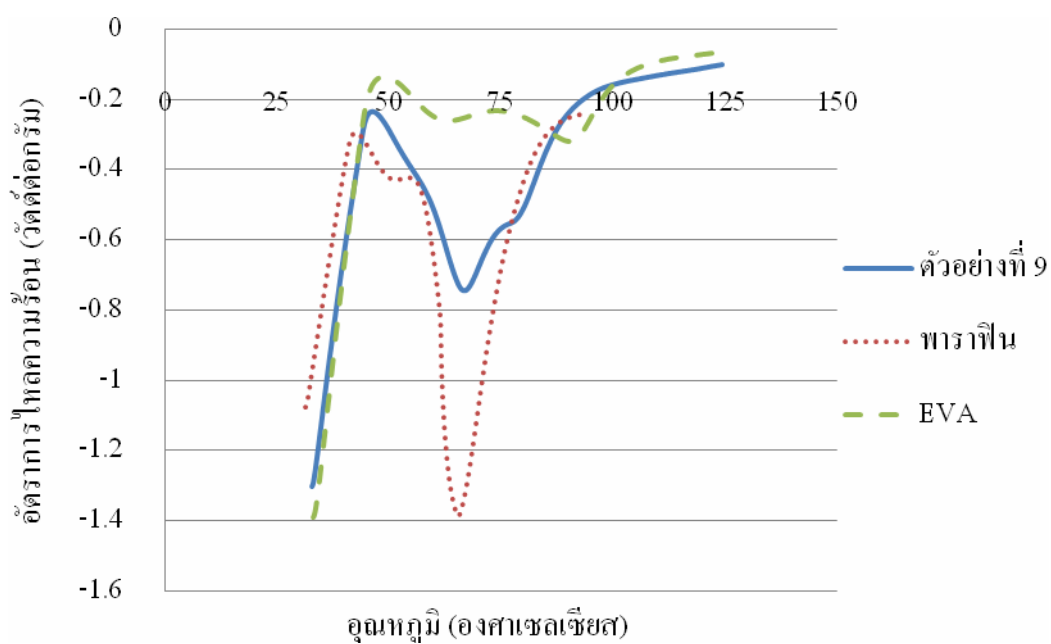
ภาพผนวกที่ ก9 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 6



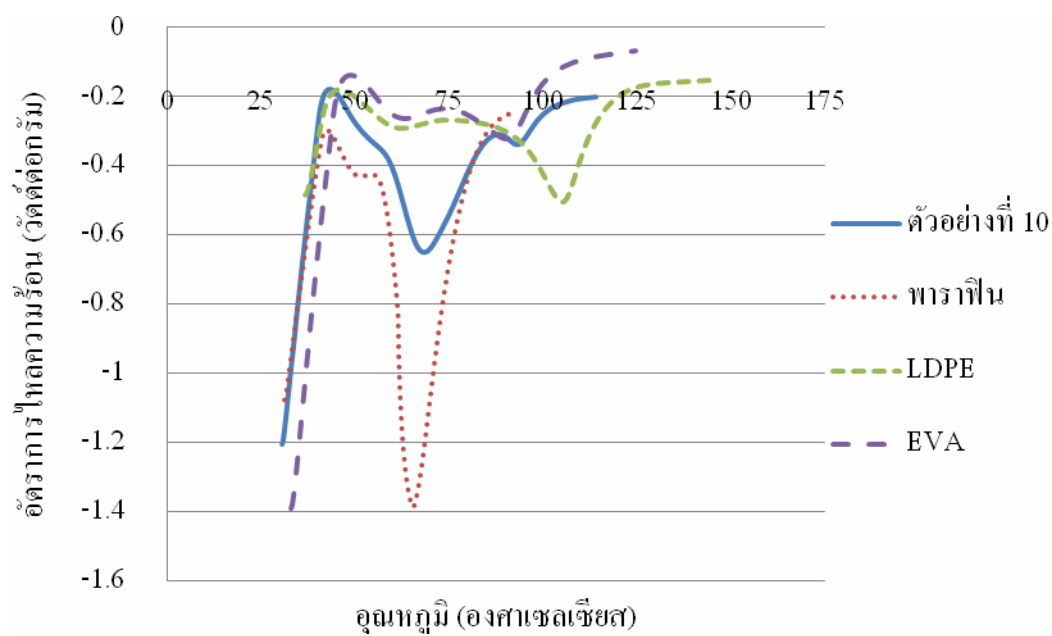
ภาพผนวกที่ ก10 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 7



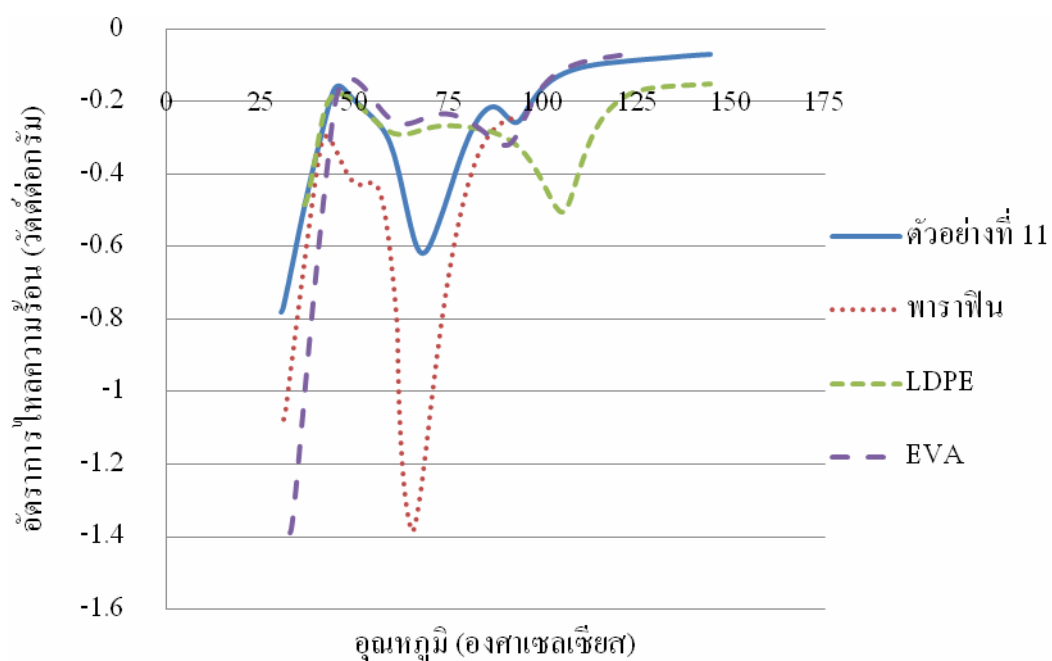
ภาพผนวกที่ ก11 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 8



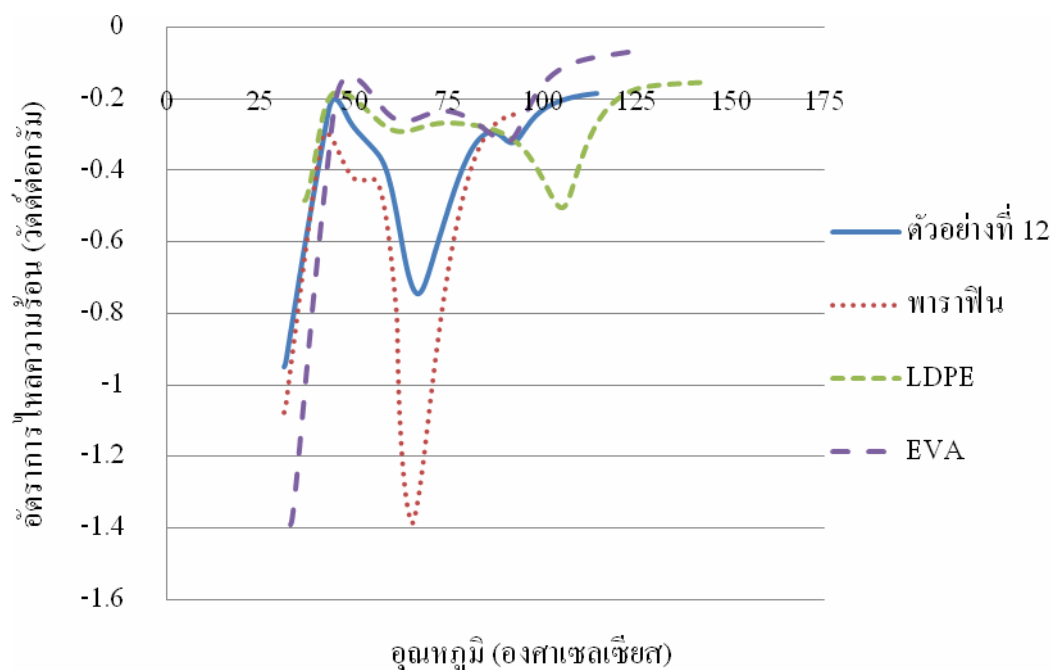
ภาพผนวกที่ ก12 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 9



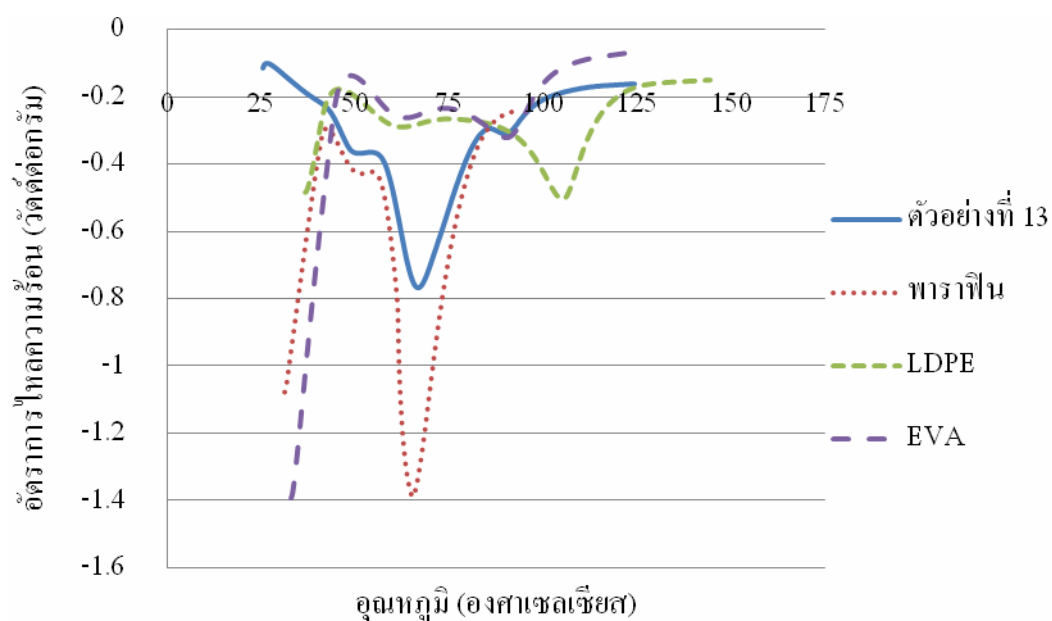
ภาพผนวกที่ ก13 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 10



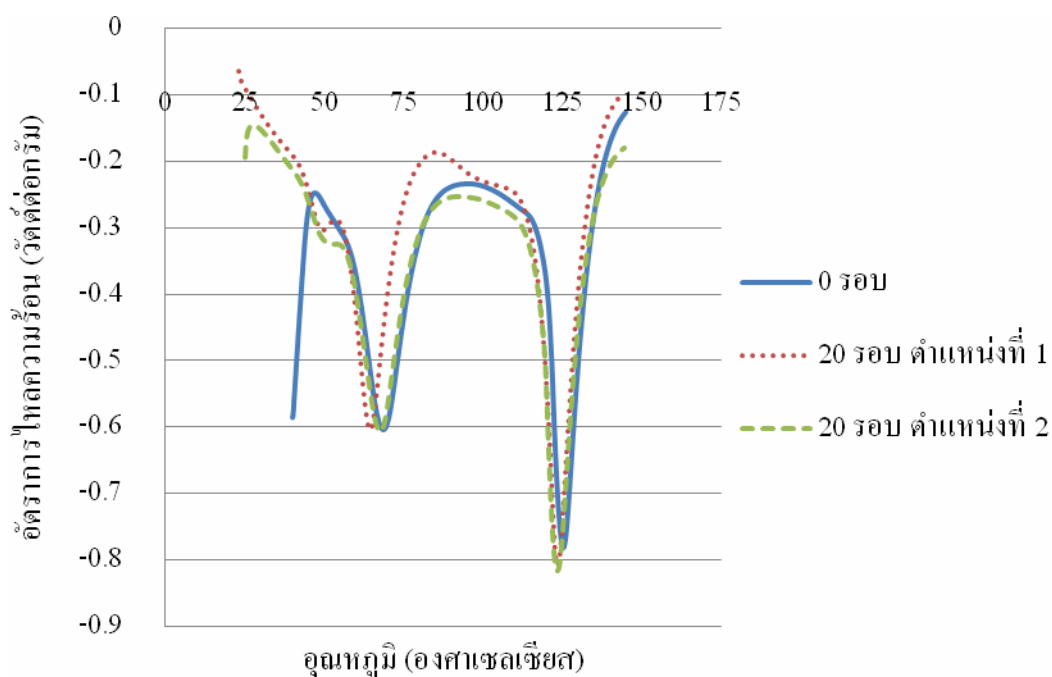
ภาพผนวกที่ ก14 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 11



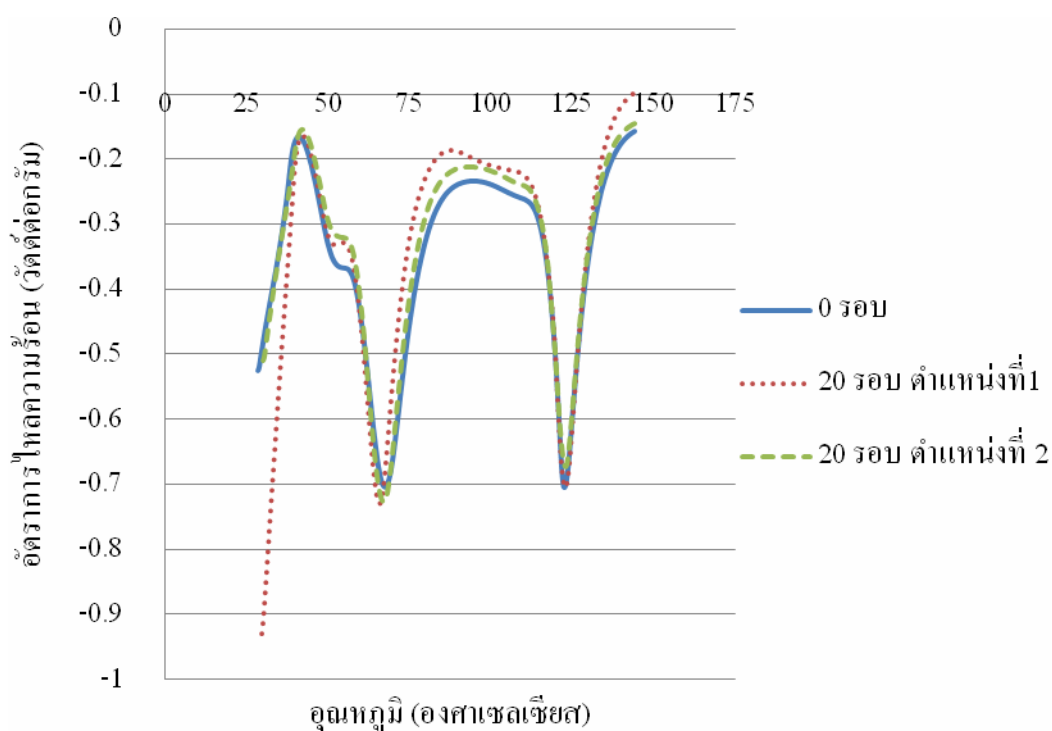
ภาพผนวกที่ ก15 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 12



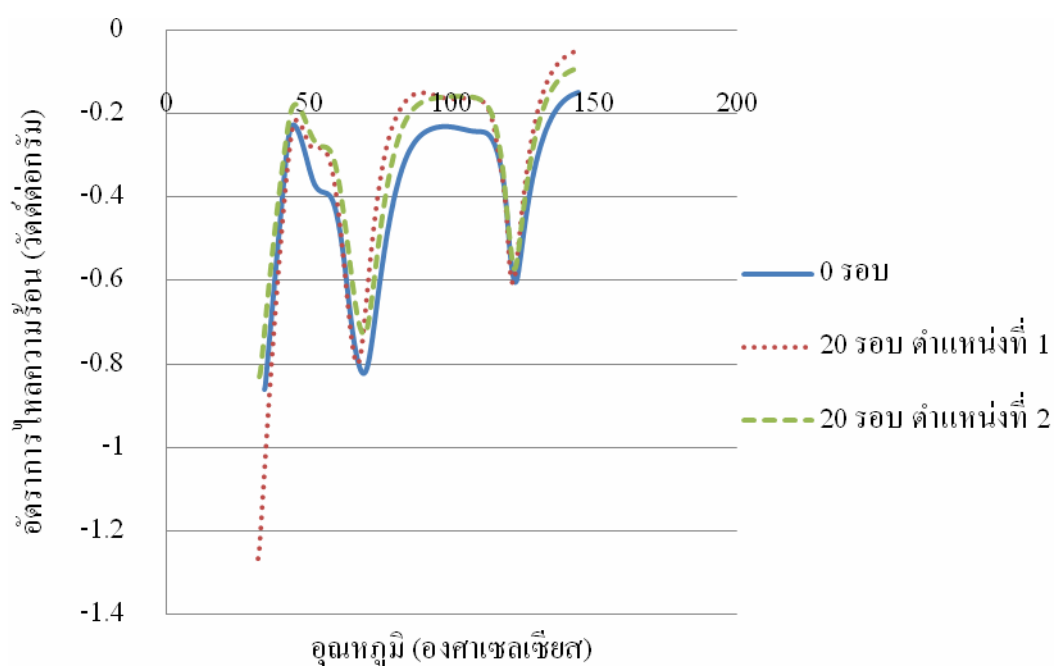
ภาพผนวกที่ 16 กราฟ DSC ของตัวอย่างที่ 13



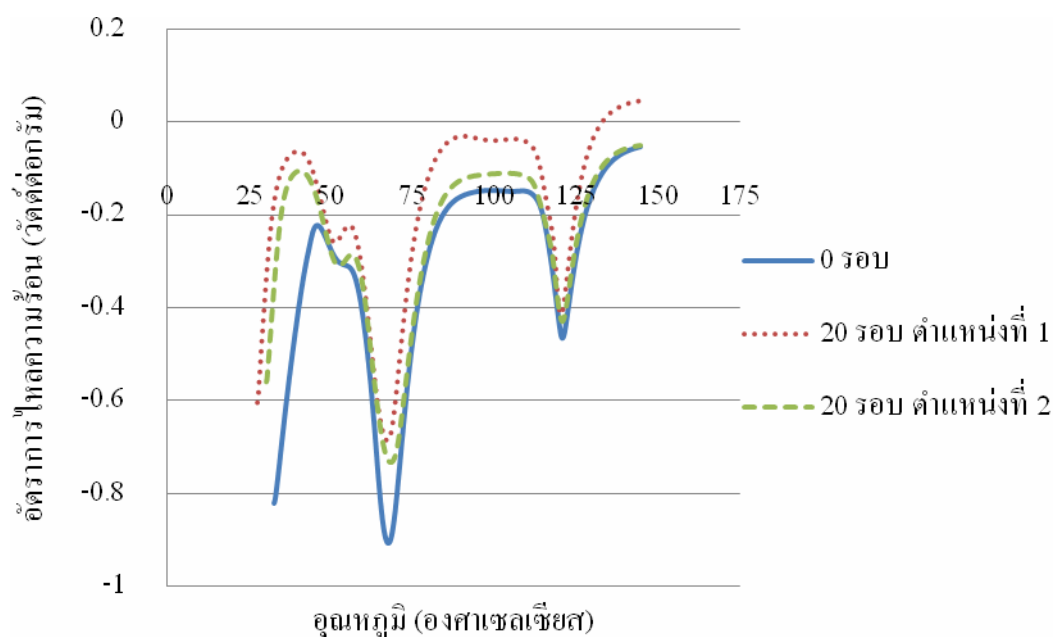
ภาพผนวกที่ 17 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 1



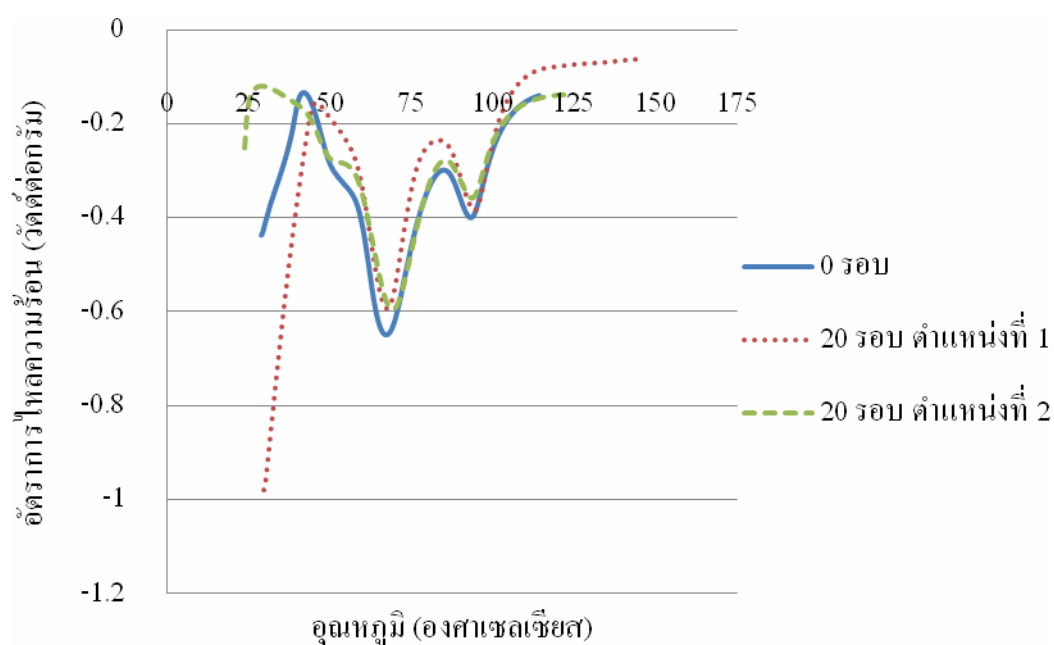
ภาพผนวกที่ ก18 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 2



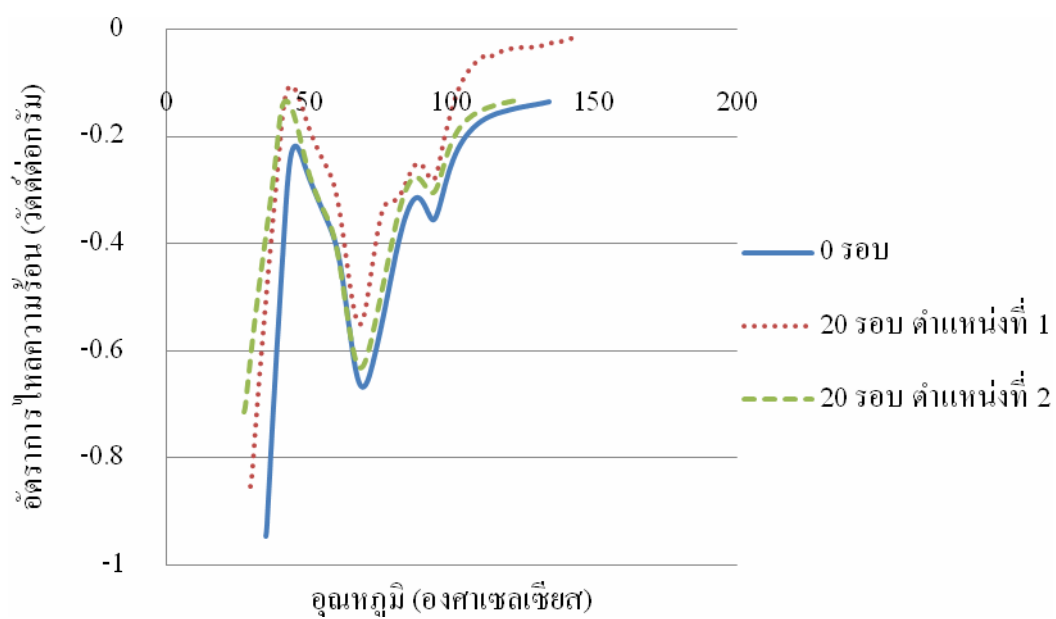
ภาพผนวกที่ ก19 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 3



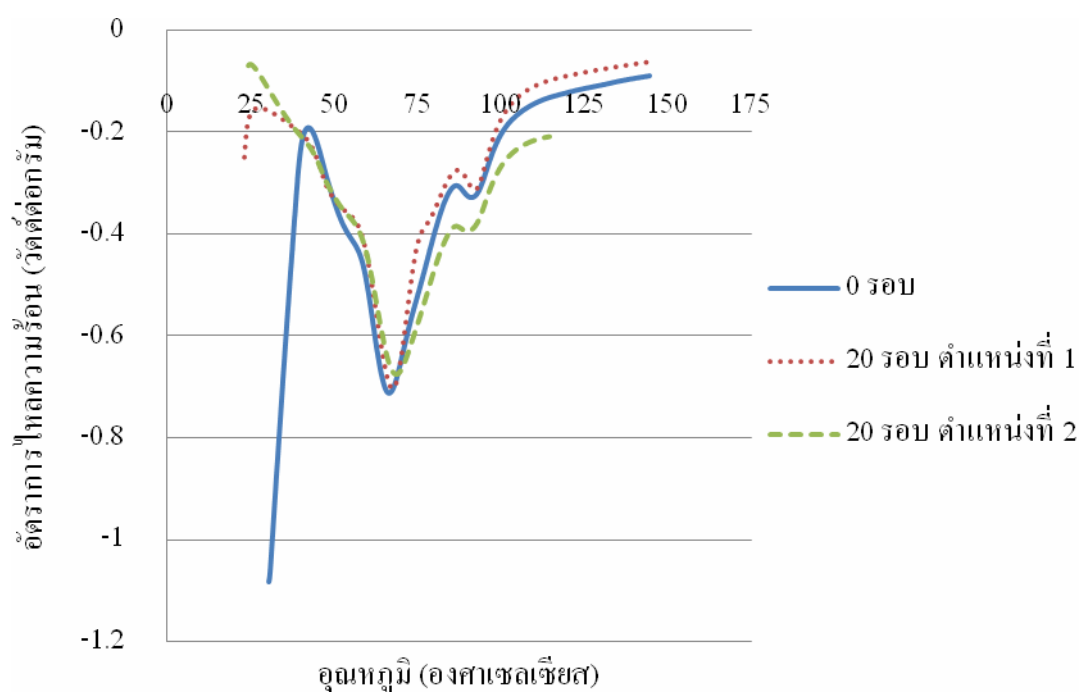
ภาพผนวกที่ ก20 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 4



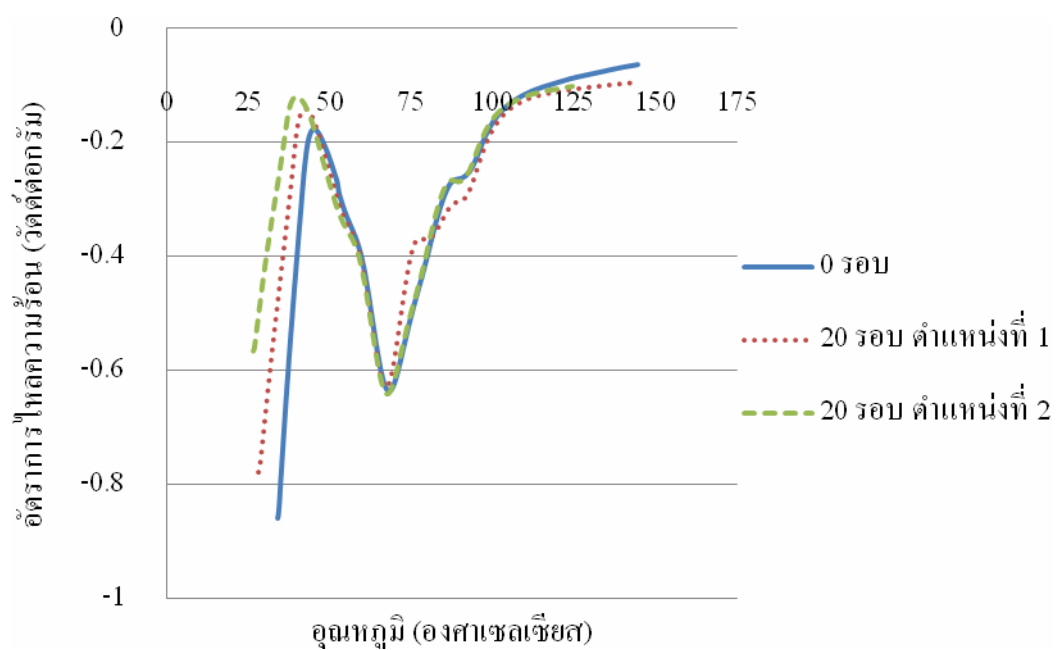
ภาพผนวกที่ ก21 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 5



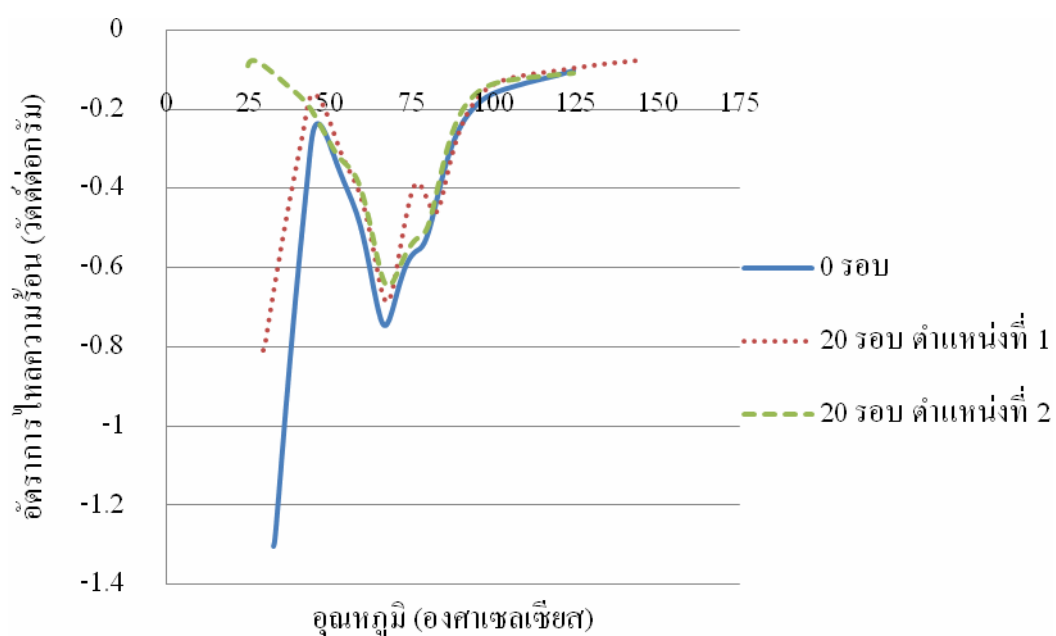
ภาพผนวกที่ ก22 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 6



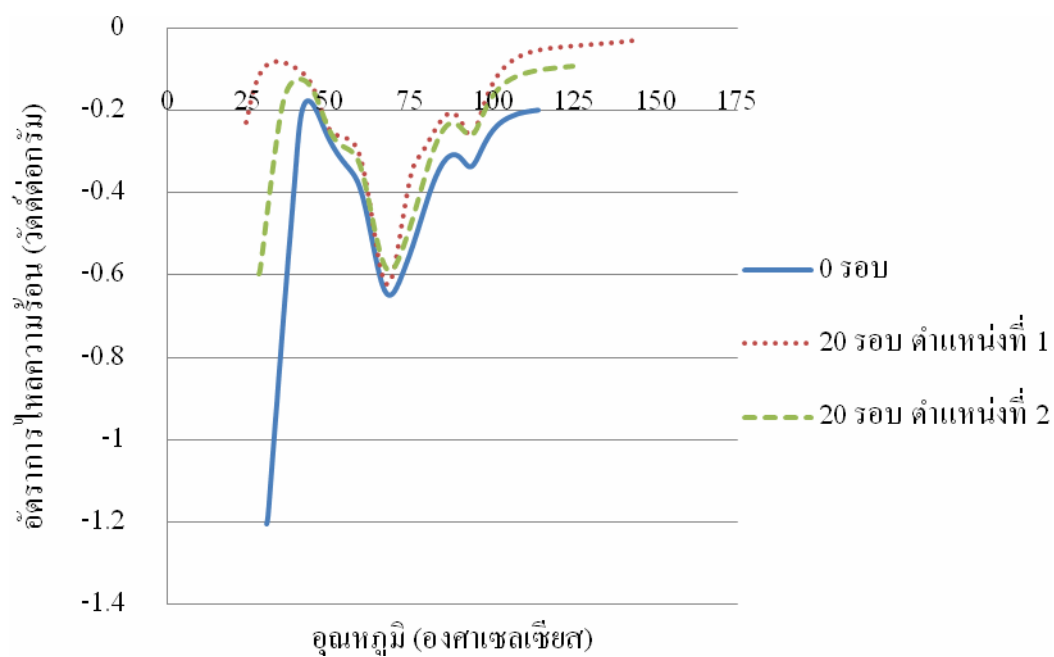
ภาพผนวกที่ ก23 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 7



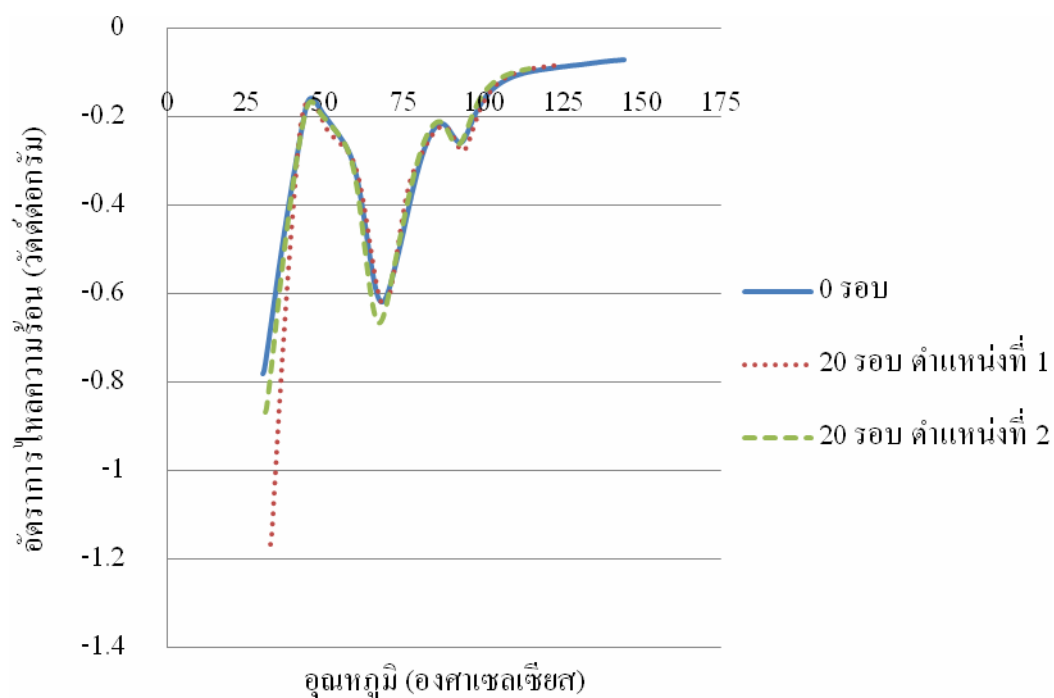
ภาพผนวกที่ ก24 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 8



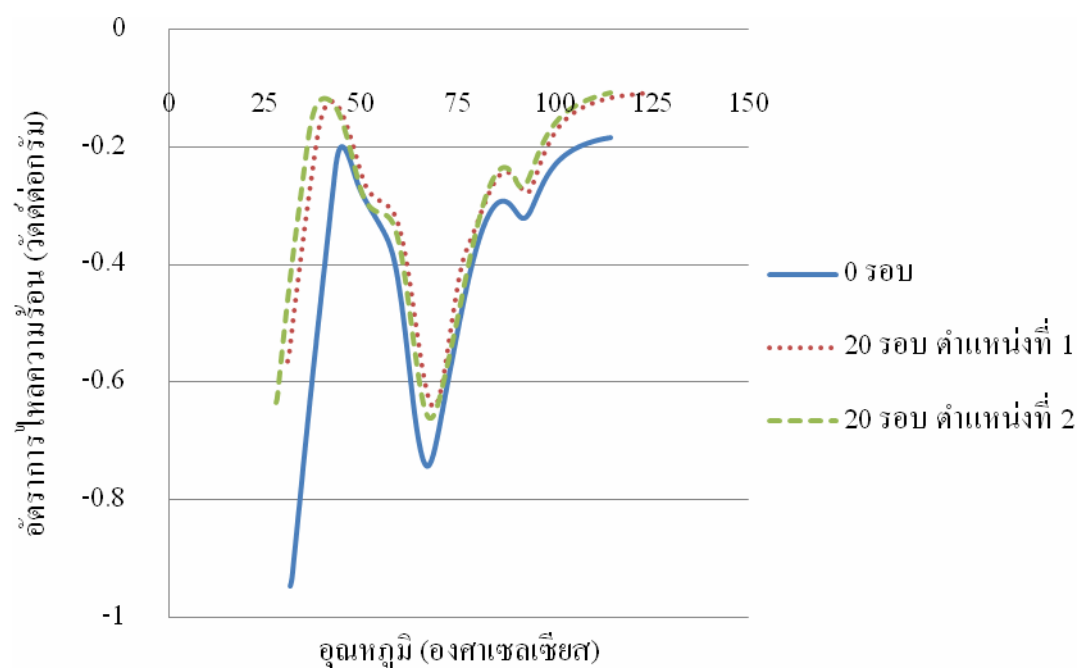
ภาพผนวกที่ ก25 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 9



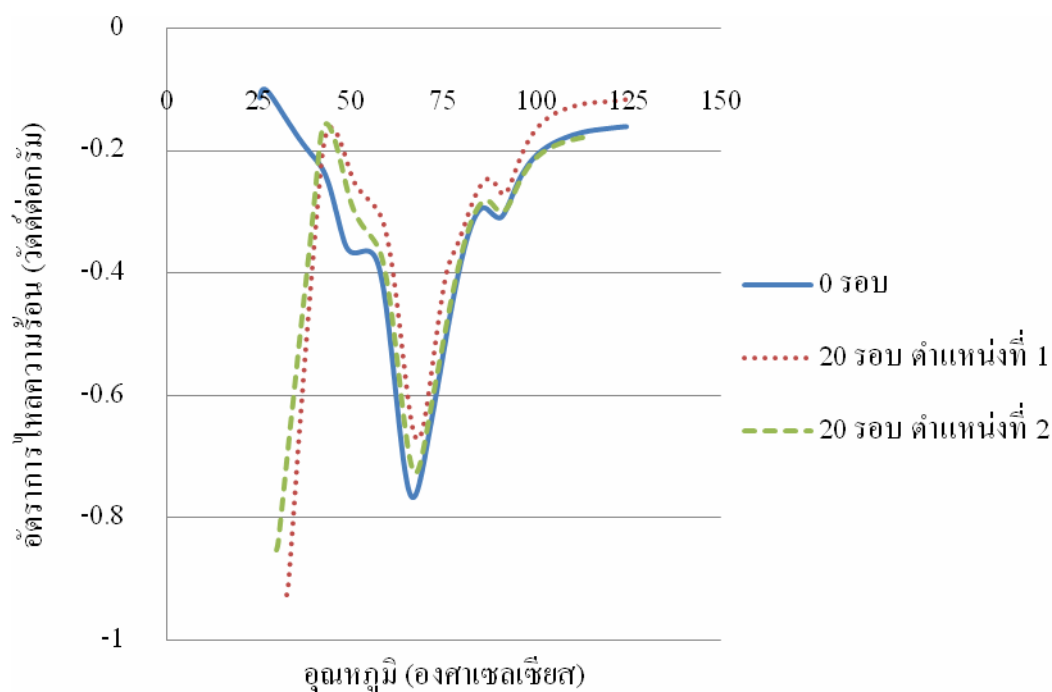
ภาพผนวกที่ ก26 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 10



ภาพผนวกที่ ก27 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 11



ภาพผนวกที่ ก28 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 12



ภาพผนวกที่ ก29 กราฟ DSC หลังรอบการใช้งาน 20 รอบของตัวอย่างที่ 13

2. ข้อมูลความหนาแน่นของ shape stabilized PCM

ตารางผนวกที่ ก6 ค่าความหนาแน่นของ shape stabilized PCM

ตัวอย่างที่	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
1	0.9282
2	0.9456
3	0.9088
4	0.9229
5	0.9172
6	0.9236
7	0.9317
8	0.9179
9	0.9167
10	0.9837
11	0.9965
12	1.0041
13	1.0348

3. ข้อมูลสมบัติทางกลศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบแรงกดของผลิตภัณฑ์

ผลการทดสอบแรงกด เพื่อหาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ โดยเครื่องทดสอบแรงกดยี่ห้อ HOUNSFIELD รุ่น H50KS ทำการกดชิ้นงานด้วยอัตรากดเท่ากันคือ 3 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดในหน่วยนิวตันและระยะการหดตัวของชิ้นงานในหน่วยมิลลิเมตร แสดงดังนี้

ตารางผนวกที่ ก7 ค่าทดสอบแรงกดของตัวอย่างชุดที่ 1 (ตัวอย่างที่ 1 ถึง 4)

ตัวอย่าง	พาราฟิน	HDPE	Compressive strength (MPa)	Max load (N)	At extensions (mm)
1	50	50	16.95	11,388	1.828
2	60	40	15.05	10,113	2.072
3	70	30	11.06	7,433	1.456
4	75	25	9.14	6,141	1.720

- หมายเหตุ 1. ค่า Compressive strength หมายถึงค่าการต้านทานแรงกด มีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล
2. ค่า Max load หมายถึงค่าแรงกดในหน่วยนิวตันที่มากที่สุดก่อนชิ้นงานจะเสียสภาพหรือแตกหัก
3. At extensions หมายถึงค่าระยะการหดตัวของตัวอย่างในหน่วยมิลลิเมตร ณ Max load

ตารางผนวกที่ ก8 ค่าทดสอบแรงกดของตัวอย่างชุดที่ 2 (ตัวอย่างที่ 5 ถึง 9)

ตัวอย่าง	พาราฟิน	LDPE	EVA	Compressive strength (MPa)	Max load (N)	At extensions (mm)
5	55	45	0	12.78	8,590	2.510
6	55	30	15	10.46	7,028	2.268
7	55	22.5	22.5	13.65	9,058	4.155
8	55	15	30	14.73	9,808	5.325
9	55	0	45	69.5	>46,700	>12.6

- หมายเหตุ 1. ค่า Compressive strength หมายถึงค่าการต้านทานแรงกด มีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล

2. ค่า Max load หมายถึงค่าแรงกดในหน่วยนิวตันที่มากที่สุดก่อนชิ้นงานจะเสียสภาพหรือแตกหัก

3. At extensions หมายถึงค่าระยะการหดตัวของตัวอย่างในหน่วยมิลลิเมตร ณ Max load

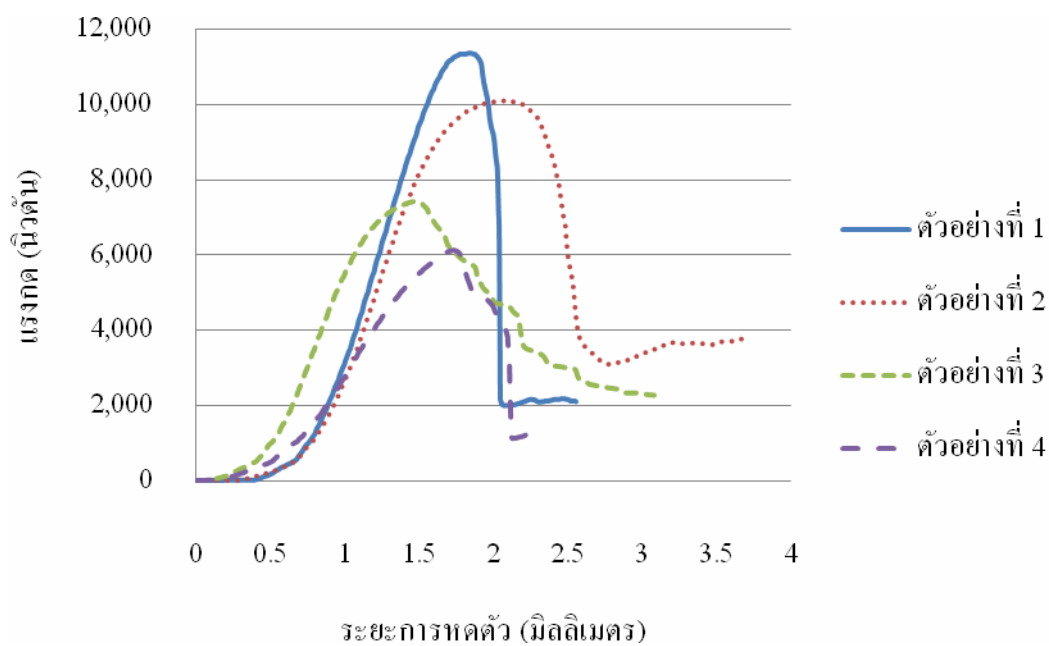
ตารางผนวกที่ ก9 ค่าทดสอบแรงกดของตัวอย่างชุดที่ 3 (ตัวอย่างที่ 10 ถึง 13)

ตัวอย่าง	พาราฟิน	LDPE	EVA	ผงกราไฟท์	Compressive strength (MPa)	Max load (N)	At extensions (mm)
10	55	27	13	5	10.63	7,140	2.436
11	55	25	10	10	10.37	6,968	2.296
12	55	20	10	15	9.81	6,593	2.056
13	55	15	10	20	8.27	5,558	1.778

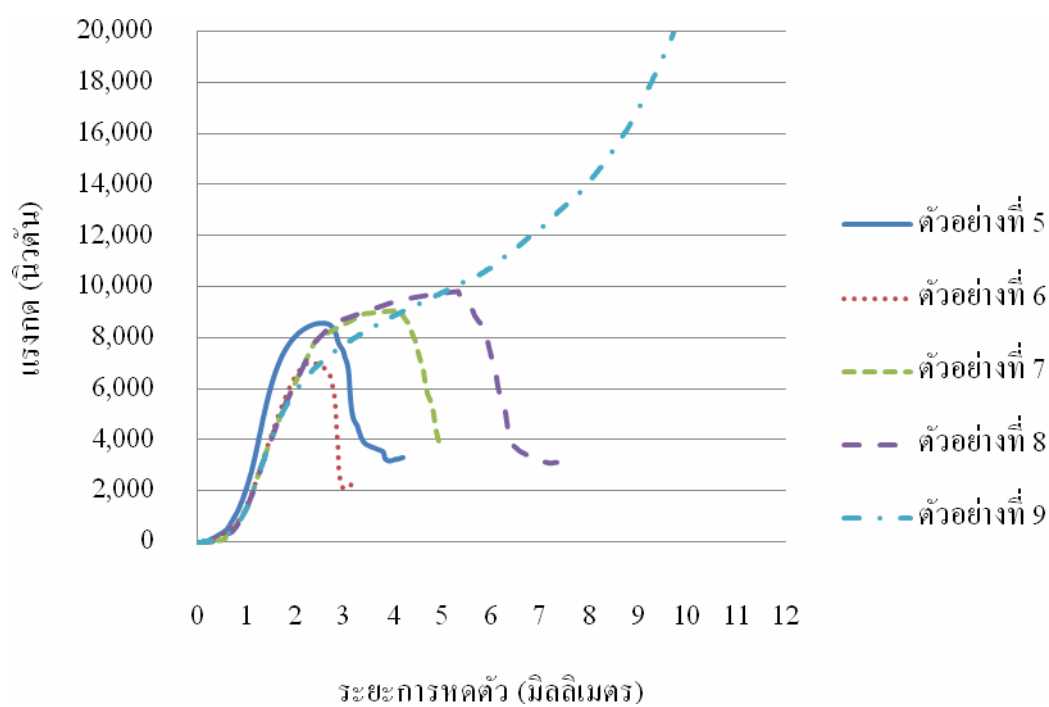
หมายเหตุ 1. ค่า Compressive strength หมายถึงค่าการต้านทานแรงกด มีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล

2. ค่า Max load หมายถึงค่าแรงกดในหน่วยนิวตันที่มากที่สุดก่อนชิ้นงานจะเสียสภาพหรือแตกหัก

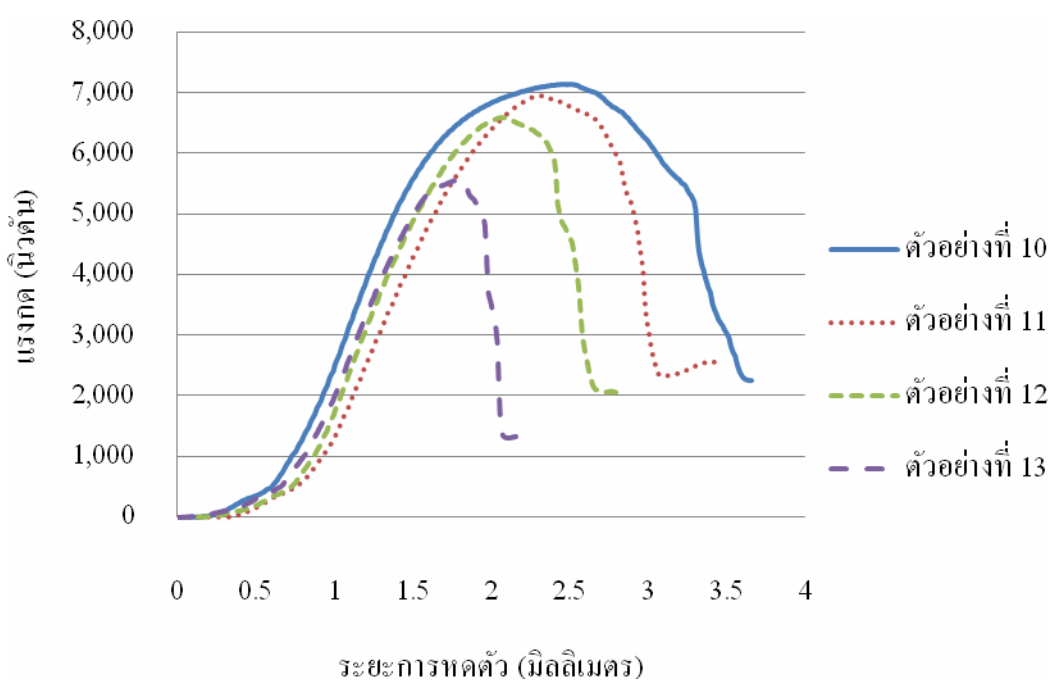
3. At extensions หมายถึงค่าระยะการหดตัวของตัวอย่างในหน่วยมิลลิเมตร ณ Max load



ภาพผนวกที่ ก30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะการหดร้าวของตัวอย่างชุดที่ 1



ภาพผนวกที่ ก31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะการหดร้าวของตัวอย่างชุดที่ 2



ภาพผนวกที่ ก32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกกดกับระยะการหตุตัวของตัวอย่างชุดที่ 3

4. ข้อมูลค่าความนำความร้อนและกราฟ heating และ cooling curve ของผลิตภัณฑ์

ผลการทดสอบหาค่าความนำความร้อนโดยเครื่องทดสอบค่าความนำความร้อน ยี่ห้อ Hot disk แสดงดังนี้

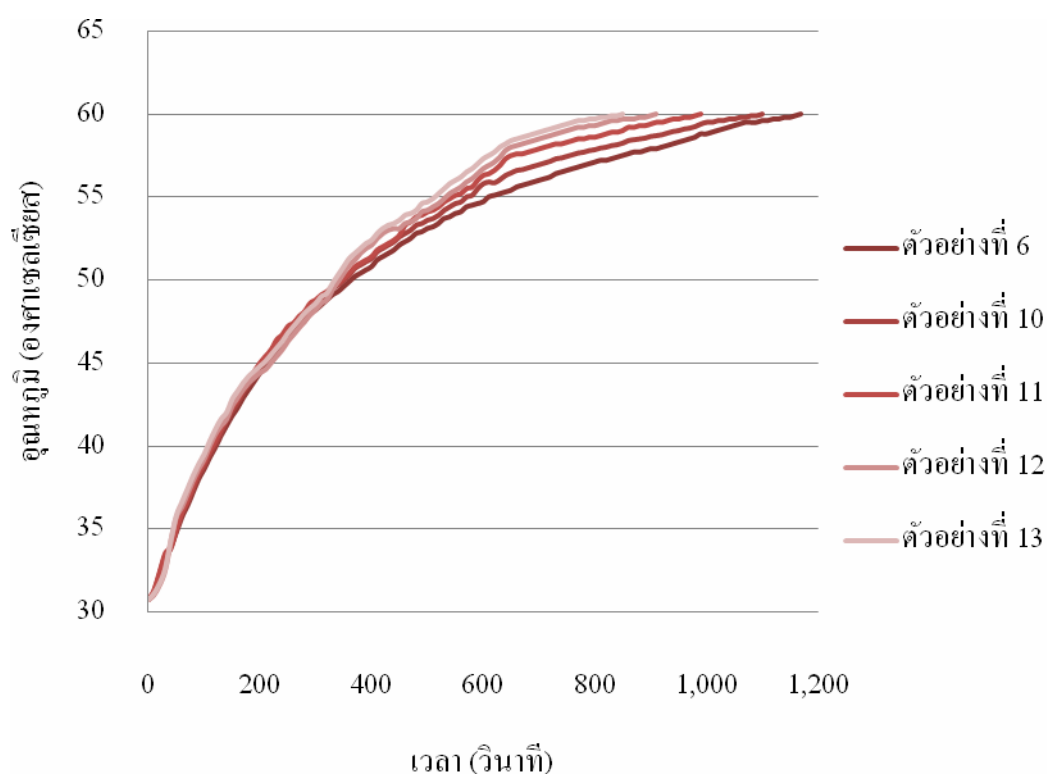
ตารางผนวกที่ ก10 ค่าความนำความร้อนของตัวอย่างชุดที่ 3 และตัวอย่างที่ 6

ตัวอย่าง	พาราฟิน	LDPE	EVA	ผงกราไฟท์	ค่าความนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)
6	55	30	15	0	0.283
10	55	27	13	5	0.312
11	55	25	10	10	0.357
12	55	20	10	15	0.428
13	55	15	10	20	0.505

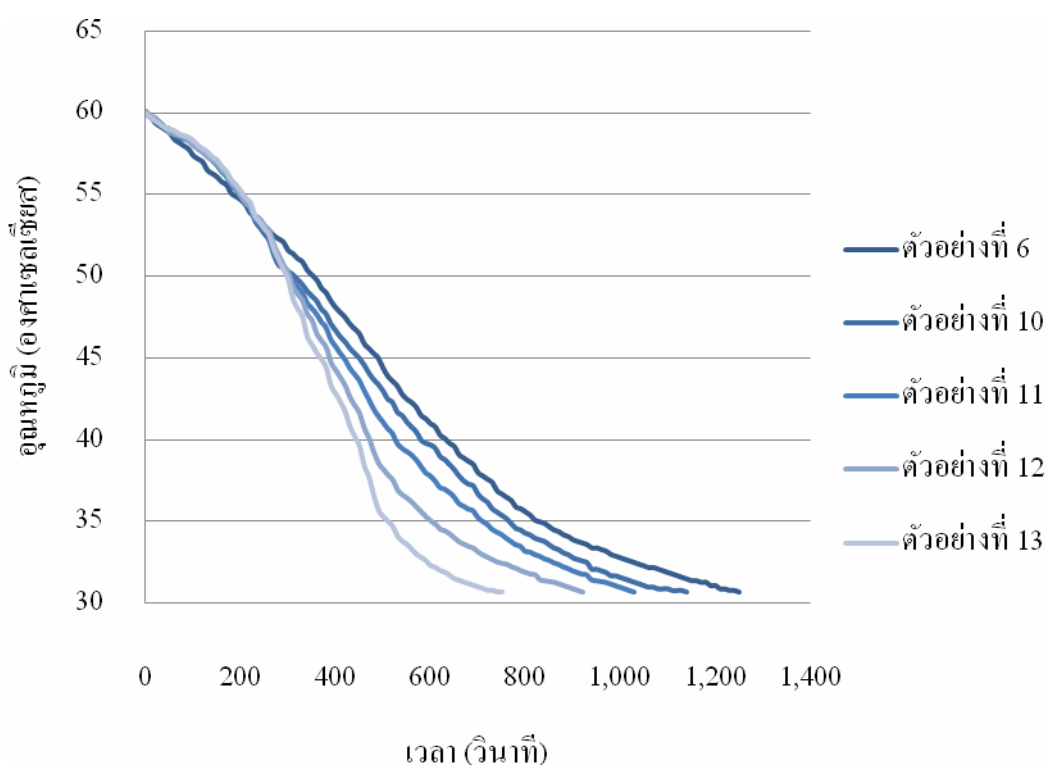
ผลการทดสอบ heating และ cooling curve โดยนำชิ้นงานที่มีเทอร์โมมิเตอร์เสียบอยู่ไปแช่ในเครื่อง water bath ที่มีน้ำอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และรอจนอ่านค่าอุณหภูมิเทอร์โมมิเตอร์ได้ 30 องศาเซลเซียส แล้วย้ายชิ้นงานไปยังเครื่อง water bath ที่มีน้ำอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เริ่มบันทึกเมื่ออุณหภูมิ 30.7 องศาเซลเซียส และบันทึกอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ทุก 10 วินาที จนอุณหภูมิชิ้นงานเพิ่มขึ้นเป็น 60 องศาเซลเซียส จากนั้นรีบย้ายชุดชิ้นงานไปยังเครื่อง water bath ที่มีน้ำอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส บันทึกอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ทุก 10 วินาที จนอุณหภูมิชิ้นงานลดลงเป็น 30.7 องศาเซลเซียส นำค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในชิ้นงานและเวลามาพล็อตกราฟ heating และ cooling curve แสดงดังนี้

ตารางผนวกที่ ก11 ค่า Heating และ Cooling curve ของชุดการทดลองที่ 3 และตัวอย่างที่ 6

ตัวอย่าง	พาราฟิน	LDPE	EVA	ผงกราไฟท์	Heating time (วินาที)	Cooling time (วินาที)
6	55	30	15	0	1,170	1,250
10	55	27	13	5	1,100	1,140
11	55	25	10	10	990	1,030
12	55	20	10	15	910	920
13	55	15	10	20	840	750



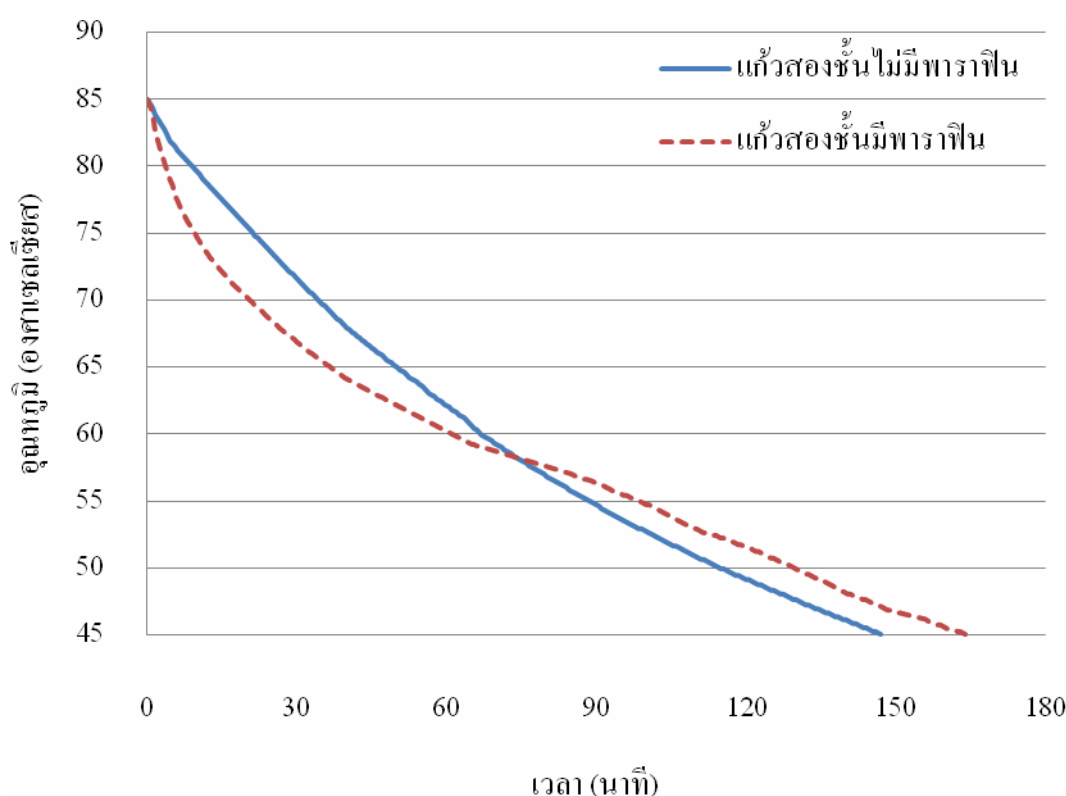
ภาพผนวกที่ ก33 Heating curve ของชุดการทดลองที่ 3 และตัวอย่างที่ 6



ภาพผนวกที่ ก34 Cooling curve ของชุดการทดลองที่ 3 และตัวอย่างที่ 6

5. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำในแก้วกับเวลาของการทดสอบแก้วสองชั้น 2 ชนิด

แก้วทดสอบสองชั้นจะถูกนำมาทดสอบหาการเปลี่ยนแปลงการลดอุณหภูมิของน้ำภายในแก้วทดสอบ โดยเปรียบเทียบระหว่างสองแก้ว ซึ่งแก้วสองชั้นทั้งสองอันมีลักษณะเหมือนกันทุกประการดังภาพที่ 45 ถึง 47 แก้วทั้งสองต่างกันว่าแก้วใบแรกจะมีอากาศอยู่ระหว่างชั้นของแก้วทั้งสอง แต่สำหรับแก้วใบที่สองนั้นบรรจุขี้ผึ้งพาราฟินขนาด 90 กรัมอยู่ระหว่างชั้นของแก้วทั้งสอง จากนั้นนำน้ำที่มีอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ปริมาณ 350 กรัม มาเทใส่ในแก้วสองชั้นที่วางบนที่รองแก้วโดยใช้ที่คิปปิกเกอร์ แล้วทำการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิของน้ำในแก้วทุก 30 วินาทีและบันทึก และนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์



ภาพผนวกที่ ก35 กราฟการลดอุณหภูมิของแก้วสองชั้นสองแบบ

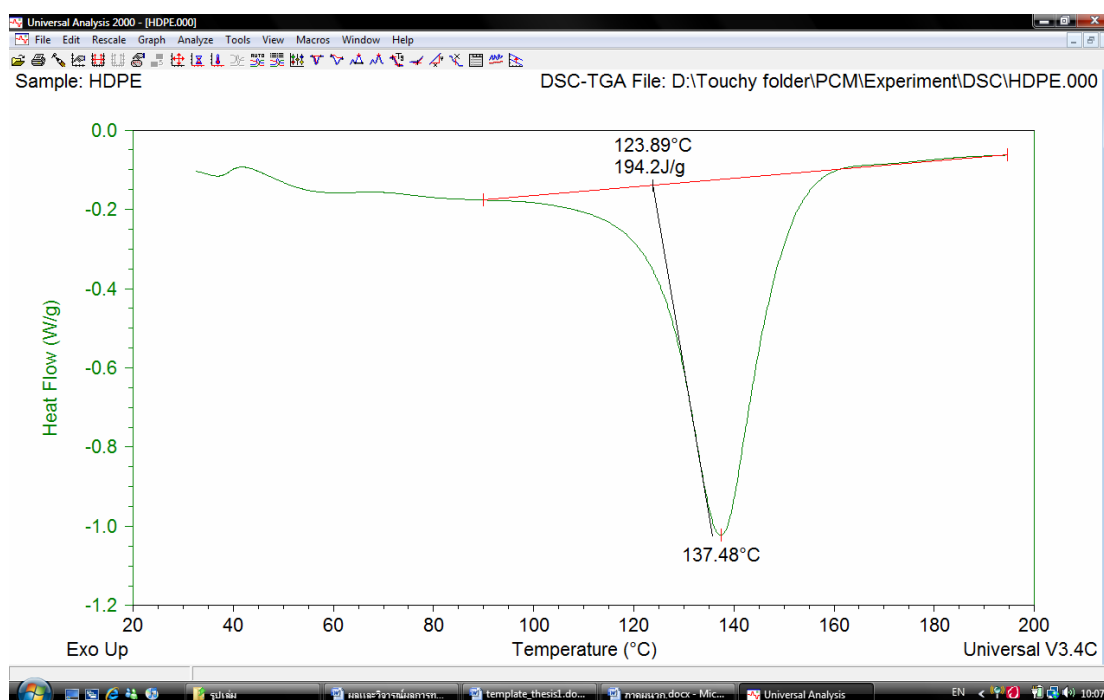
ภาคผนวก ข

การคำนวณ

1. การคำนวณค่าความร้อน 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

โดยตัวอย่างการคำนวณค่าคุณสมบัติทางความร้อนของ HDPE ซึ่งเป็นกราฟที่มี base line อย่างค่อนข้างชัดเจน ซึ่งทำให้สามารถคำนวณค่าคุณสมบัติทางความร้อนได้อย่างแม่นยำ แสดงดังนี้



ภาพผนวกที่ ข1 กราฟ DSC ของ HDPE ที่ได้จากโปรแกรม TA ANALYSIS

จากภาพผนวกที่ ข1 เห็นว่าเมื่อลากเส้น base line เชื่อมกันแล้วโปรแกรมจะให้ค่าจุดหลอมเหลวและความร้อนแฝง โดย HDPE มีจุดหลอมเหลวที่ 137.48 องศาเซลเซียส และมีค่าความร้อนแฝง 194.2 จูลต่อกรัม

สำหรับค่าความจุความร้อนจะแสดงการคำนวณการหาค่าความจุความร้อนของแข็ง โดยจะคำนวณจากค่าอัตราไหลความร้อน (heat flow) ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากเครื่อง DSC และอัตราเพิ่มความร้อน (heating rate) ซึ่งเป็นค่าที่เรากำหนดไว้ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดย

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

$$\begin{aligned} \text{เช่น ค่าความจุความร้อนที่ 39 องศาเซลเซียส} &= \frac{0.1065 \text{ W}}{\text{g}} \times \frac{\text{min}}{5 \text{ }^{\circ}\text{C}} \times \frac{\text{J}}{\text{s}} \times \frac{60 \text{ s}}{\text{W}} \times \frac{1 \text{ min}}{1 \text{ min}} \\ &= 1.278 \text{ J/g. }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

สำหรับค่าความจุความร้อนของ HDPE ที่แสดงในตารางที่ 12 นั้นเป็ค่าความจุความร้อนเฉลี่ยในช่วงอุณหภูมิ 38-42 องศาเซลเซียส ซึ่งการคำนวณจะใช้โปรแกรม Excel โดยเพียงนำค่าความจุความร้อนทั้งหมดในช่วงมารวมกันแล้วหารด้วยจำนวนค่าทั้งหมดซึ่งได้เท่ากับ 1.198 จูลต่อกรัมองศาเซลเซียส

2. การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างหรือค่าคลาดเคลื่อน (% error)

$$\%t_{\text{Change}} = \frac{(t - t_{\text{Reference}})}{t_{\text{Reference}}} \times 100$$

โดย t คือ ค่าที่เราสนใจ

$t_{\text{Reference}}$ คือ ค่าอ้างอิง

$\%t_{\text{Change}}$ คือ เปอร์เซ็นต์ที่เปลี่ยนแปลง

เช่น การคำนวณค่าคลาดเคลื่อนของความร้อนแฝงของจีฟี่งพาราฟินในสารตัวอย่างที่ผลิตได้เทียบกับความร้อนแฝงของจีฟี่งพาราฟินในสารตัวอย่างตามทฤษฎี โดยจะคำนวณกรณีตัวอย่างที่ 1 ในตารางที่ 14

ตารางผนวกที่ ข1 การคำนวณค่าคลาดเคลื่อนของความร้อนแฝงของพาราฟินในสารตัวอย่างที่ผลิตได้เทียบกับความร้อนแฝงของพาราฟินในสารตัวอย่างตามทฤษฎีกรณีตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์ พาราฟิน (%)	ความร้อนแฝง (จุลต่อกรัม)	ความร้อนแฝง ตามสัดส่วน (จุลต่อกรัม)	ค่าคลาดเคลื่อน (%)
1	50	70.95	86.75	18.21

$$\text{เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อน} = \frac{(70.95 - 86.75)}{86.75} \times 100\% = 18.21\%$$

3. การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์

ตารางผนวกที่ ข2 การคำนวณค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์

ตัวอย่างที่	P ₁	P ₂	V _p (ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร)
1	16.036	6.292	8.996	8.3509	0.9282
2	16.009	6.284	9.0906	8.5963	0.9456
3	16.022	6.285	8.9418	8.1269	0.9088
4	16.008	6.273	8.7502	8.0364	0.9229
5	16.007	6.296	9.5534	8.763	0.9172
6	16.006	6.278	8.9155	8.2352	0.9236
7	16.018	6.28	8.8172	8.215	0.9317
8	16.009	6.273	8.691	7.9774	0.9179
9	16.01	6.264	8.3486	7.6534	0.9167

10	16.009	6.283	9.0543	8.9068	0.9837
11	16.007	6.285	9.1553	9.1233	0.9965
12	16.007	6.279	8.9376	8.9805	1.0041
13	16.007	6.258	8.1723	8.4575	1.0348

ขั้นตอนที่ 1: อ่านค่า P_1 large P_2 large P'_1 large และ P'_2 large ตามลำดับ ซึ่งสามารถอ่านวิธีการทดลองได้จากหัวข้อที่ 5 ในอุปกรณ์และวิธีการ โดยค่าที่อ่านได้จากเครื่องคือ

ตารางผนวกที่ ข3 ค่าที่ใช้ในการคำนวณหาค่า V_R large

P_1 large	P_2 large	P'_1 large	P'_2 large
16.046	7.955	16.007	6.042

ขั้นตอนที่ 2: คำนวณหาค่า V_R large (Volume of Reference) จากสูตร

$$V_R \text{ large} = \frac{V_{\text{cal large}}}{[(P'_1 \text{ large}/P'_2 \text{ large}) - 1] - [(P_1 \text{ large}/P_2 \text{ large}) - 1]}$$

โดยที่ $V_{\text{cal large}} = 56.559$ ลูกบาศก์เซนติเมตร

$$\text{จะได้ } V_R \text{ large} = \frac{56.559}{[(16.007/6.042) - 1] - [(16.046/7.955) - 1]}$$

$$= 89.464 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

ขั้นตอนที่ 3: คำนวณหาค่า V_C large (Volume of sample cell) จากสูตร

$$V_C \text{ large} = V_{\text{cal large}} + V_R \text{ large}[(P_1 \text{ large}/P_2 \text{ large}) - 1]$$

$$\text{จะได้ } V_C \text{ large} = 56.559 + 89.464[(16.046/7.955) - 1]$$

$$= 147.543 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

ขั้นตอนที่ 4: คำนวณหาค่า V_p large (Volume of sample) จากสูตร

$$V_p = V_c - V_R[(P_1/P_2) - 1]$$

V_p = Volume of sample (cm^3)

V_c = Volume of sample cell (cm^3)

V_R = Volume of Reference (cm^3)

โดยการคำนวณจะแสดงการหาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่ 1

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } V_p \text{ large} &= 147.543 - 89.464[16.036/6.292] - 1] \\ &= 8.996 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร} \end{aligned}$$

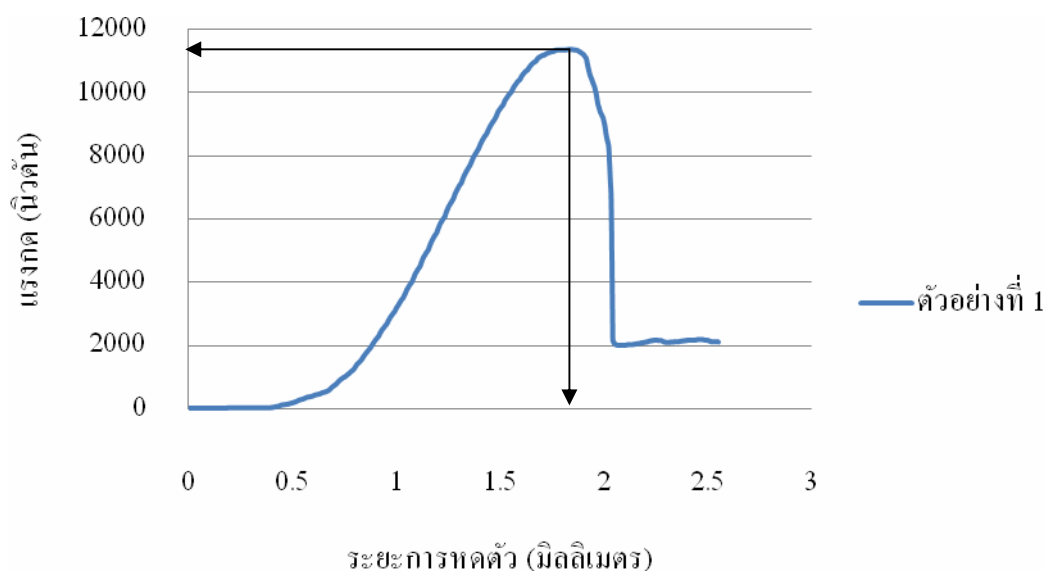
ขั้นตอนที่ 5: นำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก โดยตัวอย่างที่ 1 มีน้ำหนักเท่ากับ 8.3509 กรัม

ขั้นตอนที่ 6: หาค่าความหนาแน่นโดยใช้สูตร $D = M/V$

$$\text{จะได้ ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่ 1} = 8.3509/8.996 = 0.9282 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

4. การคำนวณหาค่าคุณสมบัติทางกลจากการทดสอบแรงกด

การแสดงผลการคำนวณค่าคุณสมบัติในที่นี้จะแสดงผลการคำนวณค่าความต้านทานแรงกดหรือค่า Compressive strength ในหน่วยเมกะปาสคาล ของตัวอย่างที่ 1



ภาพผนวกที่ ข2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะการหดตัวของตัวอย่างที่ 1

ตารางผนวกที่ ข4 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบแรงกด

ตัวอย่าง	พาราฟิน	HDPE	Compressive strength (MPa)	Max load (N)	At extensions (mm)
1	50	50	16.95	11,388	1.828

จากภาพผนวกที่ ข2 แสดงให้เห็นถึงการหาค่า max load และ at extension โดยจะดูได้จากจุดสูงสุดของกราฟ

สำหรับค่าความต้านทานแรงกดหรือ Compressive strength นั้นคำนวณได้จากสูตร

ค่าความต้านทานแรงกด (Compressive strength) = max load / พื้นที่ผิวที่รับแรงกด

ซึ่งพื้นที่ผิวที่รับแรงกดคือ 671.96 ตารางมิลลิเมตร (คำนวณจาก $\text{Area} = \pi D^2/4$; $D = 29.25 \text{ mm}$)

ดังนั้น ค่าความต้านทานแรงกด = $11,388/671.96 = 16.95$ เมกกะปาสกาล

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายสิริรัช อัสวโกสัย
วัน เดือน ปี ที่เกิด	3 กรกฎาคม พ.ศ.2525
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ.(วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนการศึกษาประเภท 3 จากโครงการพัฒนานักศึกษิตและวิจัยด้านวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ADB)