



การหาค่าความหนาแน่นและดัชนีหักเหของแก้วและการวัดสมบัติเชิงความร้อน
ของชิ้นส่วนรถยนต์บางชนิดที่เป็นพลาสติกด้วยเทคนิค DSC และ TGA

โดย

นายกิตติศักดิ์ เสงหิรัญญวงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การหาค่าความหนาแน่นและดัชนีหักเหของแก้วและการวัดสมบัติเชิงความร้อน
ของชิ้นส่วนรถยนต์บางชนิดที่เป็นพลาสติกด้วยเทคนิค DSC และ TGA

โดย
นายกิตติศักดิ์ เสงหิรัญญวงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**DETERMINATION OF DENSITIES AND REFRACTIVE INDECES OF GLASSES
AND MEASUREMENTS TO THERMAL PROPERTIES OF SOME PLASTIC
AUTOPARTS BY DSC AND TGA TECHNIQUES**

By

Kittisak Hanghirunyawong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

MASTER OF SCIENCE

Program of forensic science

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2011

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การหาค่าความหนาแน่นและดัชนีหักเหของแก้วและการวัดสมบัติเชิงความร้อนของชิ้นส่วนรถยนต์บางชนิดที่เป็นพลาสติกด้วยเทคนิค DSC และ TGA ” เสนอโดย นายกิตติศักดิ์ เสงหิรัญวงษ์ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ชารัทสนวงศ์)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. อาจารย์ ดร.ศุภชัย สุภลักษณ์นารี
2. อาจารย์ ดร.ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ พันตำรวจเอกสันต์ สุขวังน)

...../...../.....

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย พุทธวงศ์)

...../...../.....

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ศุภชัย สุภลักษณ์นารี)

...../...../.....

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง)

...../...../.....

50312304 : สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์

คำสำคัญ : ความหนาแน่น, ดัชนีหักเห, แก้ว, ชิ้นส่วนรถยนต์ที่เป็นพลาสติก, DSC, TGA

กิตติศักดิ์ เสงหิรัญญวงษ์ : การหาค่าความหนาแน่นและดัชนีหักเหของแก้วและการวัดสมบัติเชิงความร้อนของชิ้นส่วนรถยนต์บางชนิดที่เป็นพลาสติกด้วยเทคนิค DSC และ TGA. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อ.ดร.ศุภชัย ศุภลักษณ์นารี และ อ.ดร.ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง. 154 หน้า.

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการหาค่าดัชนีหักเหและความหนาแน่นของเศษแก้วโดยวิธีการ Becke line และการแทนที่น้ำ ตามลำดับ มีวัตถุประสงค์เพื่อนำค่าทั้งสองมาใช้ในการระบุชนิดของเศษแก้วตัวอย่างจำนวน 11 ชนิด ซึ่งมีค่าดัชนีหักเหอยู่ในช่วง 1.47258 ถึง 1.52363 และมีความหนาแน่นในช่วง 1.932 g/cm^3 ถึง 2.451 g/cm^3 โดยผลการทดลองแสดงว่าค่าทั้งสองเป็นสมบัติเฉพาะตัวของเศษแก้วแต่ละชนิด ยกเว้น กระจกแผ่นเรียบใสและขวดน้ำอัดลมใส ที่มีค่าทั้งสองแตกต่างกันน้อยมาก

ส่วนที่สอง เป็นการศึกษาการวัดสมบัติเชิงความร้อน (Thermal Analysis) ของชิ้นส่วนรถยนต์บางชนิดที่เป็นพลาสติกเพื่อจำแนกและระบุชนิดของพลาสติกด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) และ Thermogravimetric Analysis (TGA) ในตัวอย่างพลาสติกที่เป็นชิ้นส่วนของรถยนต์ 17 ตัวอย่าง ซึ่งชิ้นส่วนพลาสติกของรถยนต์ขนาดเล็กๆเหล่านี้ อาจเป็นวัตถุพยานที่สำคัญ จากเทอร์โมแกรม (Thermogram) ของ DSC พบ peak แบบดูดพลังงานเกิดขึ้น 1 หรือ 2 peak ในตัวอย่างในช่วงของอุณหภูมิ 162 ถึง 484°C โดยมีค่า ΔH อยู่ในช่วง 5.76 ถึง 20.54 J/g ส่วนการวิเคราะห์ TGA พบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 1 และ 2 ชั้น โดยมีช่วงการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 115.85 ถึง 931.16°C และมีเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวอย่างที่หายไปในช่วง 1.95 ถึง 100.00% ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างพลาสติกด้วยเทคนิคทั้งสอง พบว่า สามารถจำแนกตัวอย่างเป็น 3 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกเป็นตัวอย่างพลาสติกที่ทำมาจาก polypropylene ได้แก่ กันชนหน้ารถ, กรอบตะเบีย่นรถ และกรอบพลาสติกของไฟหน้ารถ ในกลุ่มที่ 2 ประกอบด้วย ชุดแต่งด้านข้างรถ (skirt), กันชนหลังรถ และพลาสติกของกระจกมองข้าง ตัวอย่างพลาสติกเหล่านี้ ทำมาจาก acrylonitrile styrene acrylate ส่วนในกลุ่มสุดท้ายไม่จัดอยู่ในกลุ่มใด ซึ่งไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นพลาสติกประเภทใด อย่างไรก็ตามผลการศึกษาที่ได้ แสดงความเป็นไปได้ที่จะใช้เทคนิค DSC และ TGA ในการระบุชนิดของพลาสติกและใช้ในงานทางนิติวิทยาศาสตร์

สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. 2.

50312304 : MAJOR : FORENSIC SCIENCE

KEY WORD : DENSITIES, REFRACTIVE INDEX, GLASSES, SOME PLASTIC
AUTOPARTS, DSC, TGA

KITTISAK HANGHIRUNYAWONG : DETERMINATION OF DENSITIES AND
REFRACTIVE INDECES OF GLASSES AND MEASUREMENTS TO THERMAL
PROPERTIES OF SOME PLASTIC AUTOPARTS BY DSC AND TGA TECHNIQUES.
THESIS ADVISORS : SUPACHAI SUPALUKNARI, Ph.D., AND SIRIRAT
CHOOSAKOONKRIANG, Ph.D. 154 pp.

The research project in this thesis is composed of two parts. The first part is the study on the measurements of refractive indices and densities of glasses by the Becke line method and the method of water displacement respectively. The aim was to use the two parameters for the identification of glass types. Eleven types of glass were chosen for the study. The refractive indices of the samples were in the range of 1.47258 – 1.52363 while the densities of the samples ranged from 1.932 g/cm³ to 2.451 g/cm³. The two parameters were found to be characteristic for each type of glass with the exception of the values for float glass and soda bottle which were found to be nearly identical.

The second part of the project is the examination of thermal properties of plastics car parts using the Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Thermal Gravimetric Analysis (TGA). Seventeen plastics samples of the exterior car parts were selected for this work. These parts can be commonly found in the scenes of car accidents. In the DSC thermograms of the samples studied, one or two endothermic peaks were observed in the temperature range of 162 – 484°C with the ΔH values in the range of 5.76 – 20.54 J/g. The TGA thermograms displayed one or two onset temperatures of the mass change in the range of 115.85 – 931.16°C with the percentages of mass loss in the range of 1.95 – 100.00%. From the DSC and TGA data, it is possible to distinguish samples into three groups. The first group is for samples made of polypropylene, namely the front bumper, the license plate frame and the headlight lens. The samples in the second group are the side skirt, the rear bumper and the plastic part of outside-rear-view mirror. These samples are made of acrylonitrile styrene acrylate. The last group is for the other samples of unknown plastic type. However, the results from this study have demonstrated the possibility of using the DSC and TGA techniques in the identification of plastic samples collected for forensic examination.

Program of FORENSIC SCIENCE Graduate School, Silpakorn University Academic Year 2011

Student's signature

Thesis Advisors' signature 1. 2.

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง การหาค่าความหนาแน่นและดัชนีหักเหของแก้วและการวัดสมบัติเชิงความร้อนของชิ้นส่วนรถยนต์บางชนิดที่เป็นพลาสติกด้วยเทคนิค DSC และ TGA สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์จากผู้มีพระคุณทั้งหลายที่กรุณาให้คำแนะนำและความช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่ง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์.ดร.ศุภชัย ศุภลักษณ์นารี และ อาจารย์.ดร.ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษา พร้อมทั้งช่วยตรวจทานแก้ไขในส่วนที่บกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดี ตลอดจนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยกราบขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ พันตำรวจเอกสันดี สุขวัฒน์ ประธานกรรมการ และ รองศาสตราจารย์ ดร.วิรัช พุททวงศ์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้เสียสละเวลาในการตรวจสอบ และให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไข ซึ่งทำให้การวิจัยครั้งนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยกราบขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขานิติวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับนิติวิทยาศาสตร์อันเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณคงกัก ภัคคมหพกุล ผู้จัดการศูนย์บริการ สอนดำ นครปฐม พี่อนุพงษ์ บ.โตโยต้า นครปฐม ร้าน เอส เค กระจกรถยนต์ ร้านจำหน่ายเฟอร์นิเจอร์เก่า และร้านมิตรเจริญ ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางวัสดุในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณชนม์ รอดผล คุณสารรัตน์ ล้วนดี และ น.ส. ลัดดาวัลย์ ศรีวัฒนา ที่ให้ความรู้ในการใช้เครื่องมือและคำแนะนำต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ สาขานิติวิทยาศาสตร์ รุ่น 3 มหาวิทยาลัยศิลปากร ทุกคน สำหรับมิตรภาพและสีสันในการเรียน

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอขอบพระคุณ พ่อแม่ พี่น้อง และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ได้เอาใจใส่ คอยเป็นกำลังใจและมอบความรักให้เสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ฎ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
สมมติฐานของการวิจัย	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
ขั้นตอนการวิจัย	4
นิยามศัพท์เฉพาะ	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	5
2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	6
ประวัติและวิวัฒนาการของแก้ว.....	6
การหักเหของแสง.....	24
หลักการของ Becke line	29
วัสดุพลาสติก	32
การวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal Analysis)	58
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	65
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	67
วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	67
วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	67
สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	71
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	72

บทที่	หน้า
วิธีการวิจัย.....	73
การเตรียมตัวอย่างแก้วและพลาสติก.....	73
การหาความหนาแน่นของเศษแก้ว	74
การหาค่าดัชนีหักเหของสารเคมี.....	74
การหาค่าดัชนีหักเหของเศษแก้ว.....	75
การวิเคราะห์เศษชิ้นส่วนพลาสติกด้วยเครื่อง DSC	76
การวิเคราะห์เศษชิ้นส่วนพลาสติกด้วยเครื่อง TGA.....	78
4 ผลการวิจัย	79
การหาความหนาแน่นของเศษแก้ว	79
การหาค่าดัชนีหักเหของเศษแก้ว.....	81
การศึกษาสมบัติทางความร้อนของเศษพลาสติก	84
5 บทสรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	92
สรุปและอภิปรายผล	92
การหาความหนาแน่นและดัชนีหักเหของเศษแก้ว.....	92
การศึกษาสมบัติทางความร้อนของเศษพลาสติก	93
ข้อเสนอแนะ.....	95
บรรณานุกรม.....	96
ภาคผนวก	105
ภาคผนวก ก น้ำหนัก ปริมาตร และความหนาแน่นของเศษแก้ว 11 ชนิด.....	106
ภาคผนวก ข ค่าดัชนีหักเหของสารเคมีและช่วงดัชนีหักเหของ เศษแก้วตัวอย่าง 11 ชนิด	112
ภาคผนวก ค เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค DSC.....	118
ภาคผนวก ง เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค TGA.....	136
ประวัติผู้วิจัย	154

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตัวอย่างของพลาสติกกิ่งผลึกและพลาสติกอสัณฐาน	50
2	แสดงชนิดของแก้วและแหล่งที่มา.....	67
3	แสดงชนิดของพลาสติกและแหล่งที่มาของบริษัทผู้ผลิต.....	68
4	แสดงสารเคมี 9 ชนิดและแหล่งที่มา.....	71
5	การตั้งเครื่อง Pyris Diamond DSC	77
6	การตั้งเครื่อง 910 DSC.....	77
7	การตั้งเครื่อง TGA.....	78
8	ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของเศษแก้วตัวอย่าง 11 ชนิด (g/cm^3).....	79
9	ค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยของเศษแก้วตัวอย่าง 11 ชนิด.....	81
10	ผลการวิเคราะห์เศษพลาสติกตัวอย่างด้วยเทคนิค DSC และ TGA	88
11	ความหนาแน่นของเศษแก้วจากแก้วน้ำใส.....	107
12	ความหนาแน่นของเศษแก้วจากกระจกแผ่นเรียบใส.....	107
13	ความหนาแน่นของเศษแก้วจากขวดน้ำอัดลมใส.....	107
14	ความหนาแน่นของเศษแก้วจากชามแก้วใส.....	108
15	ความหนาแน่นของเศษแก้วจากกระจกประตูรถยนต์	108
16	ความหนาแน่นของเศษแก้วจากกระจกหน้าต่างรถยนต์	108
17	ความหนาแน่นของเศษแก้วจากปีกเกออร์ใส	109
18	ความหนาแน่นของเศษแก้วจากขวดเหล้าใส	109
19	ความหนาแน่นของเศษแก้วจากจานแก้วใส.....	109
20	ความหนาแน่นของเศษแก้วจากขวดแก้วใส	110
21	ความหนาแน่นของเศษแก้วจากกระจกหน้าต่างใส.....	110
22	ความหนาแน่นเฉลี่ยของเศษแก้วตัวอย่าง 11 ชนิด (g/cm^3).....	110
23	ค่าดัชนีหักเหของสารเคมี 9 ชนิดที่วัดด้วย Refractometer	113
24	ค่าดัชนีหักเหของสารเคมีผสมระหว่าง 2 (Cyclohexanol) กับ 3 (Ethyl Benzoate) ที่วัดด้วย Refractometer.....	113
25	ค่าดัชนีหักเหของสารเคมีผสมระหว่าง 6 (Anisole) กับ 7 (Methyl Salicylate) ที่วัดด้วย Refractometer.....	114

ตารางที่		หน้า
26	ช่วงดัชนีหักเหของแสงแก้วตัวอย่าง 11 ชนิด	117

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กระจกซีท	16
2	กระจกโพลท	17
3	กระจกดอกกลวกลาย	18
4	กระจกลาวด	18
5	กระจกตัดแสง.....	19
6	กระจกสะท้อนแสง.....	20
7	กระจกนิรภัยหลายชั้น.....	21
8	กระจกนิรภัยเทมเปอร์.....	22
9	กระจกฉนวน	23
10	กระจกเงา.....	23
11	แสดงรังสีตกกระทบ รังสีหักเห และรังสีสะท้อนของแสง เมื่อแสงเดินทาง จากอากาศไปยังน้ำ.....	24
12	การหักเหของหน้าคลื่นแสงที่ไม่ตั้งฉากกับขอบเขตแบ่งตัวกลาง	25
13	การสะท้อนกลับหมดของแสงเมื่อผ่านปริซึมแก้ว	27
14	เมื่อแสงผ่านปริซึมจะบ่ายเบนเป็นมุม γ	27
15	แสงที่ผ่านปริซึมเมื่อมุม $\alpha = \beta$	28
16	ปริซึมกระจายแสงขาวออกเป็นสีต่างๆ.....	29
17	Friedrich Johann Karl Becke.....	30
18	รูปแบบการเกิดเส้น Becke line.....	32
19	ที่หุ้มรองเท้าป้องกันฝุ่นและสิ่งสกปรกทำจากโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ.....	35
20	แผ่นฟิล์มบางทำมาจากโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแบบ โครงสร้างเส้นตรง...	36
21	ขวดพลาสติกชนิดต่างๆที่เป็นโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง	36
22	พลาสติกส่วนภายนอกและภายในของรถทำจากโพลีโพรไพลีน ซึ่งออกแบบมา เพื่อให้รถมีน้ำหนักเบาและประหยัดพลังงาน	37
23	ล้อรถลำเลียงที่เป็น โพลีเอไมด์.....	38
24	เฟืองต่างๆที่ผลิตจาก โพลีเอซีทิล	39
25	กระทะที่เคลือบด้วยเทฟลอน	40

ภาพที่	หน้า
26	โพลีเอสเตอร์แบบเทอร์โมพลาสติกนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนของหลังคา กันแดดของรถ 40
27	สายรัดที่ทำจากโพลีเอเทอร์อีเทอร์คีโตน 41
28	กรอบพลาสติกของสมาร์ตโฟนที่ทำมาจาก PVC แข็ง..... 42
29	กรอบตานิรภัยที่ทำจาก PVC อ่อน..... 43
30	รถคันแรกที่มีกระจกหน้ารถเป็นพลาสติก 44
31	พลาสติกชนิดต่างๆที่ทำมาจากโพลีสไตรีน..... 45
32	กันชนหน้าที่เป็น ABS..... 46
33	โพลีคาร์บอเนตที่นำมาใช้ทำวัสดุต่างๆ..... 47
34	ตัวกรองแบบต่างๆที่ผลิตจากโพลีเอเทอร์ซัลโฟน 47
35	วงจรไฟฟ้าที่ทำด้วยโพลีไอไมด์ 48
36	สไตรีน-บูตาดีนสามารถนำมาทำเป็นยางรถยนต์ได้ 49
37	กันกรองบุหรี่ที่ทำจากเซลลูโลสอะซีเตต 50
38	แบคคาไลต์แบบต่างๆ 52
39	สิ่งของที่ทำจากยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน 53
40	ภาชนะต่างๆที่ผลิตจากเมลามีนเรซิน..... 54
41	กระดุมที่ทำมาจากโพลีเอสเตอร์ไมอิมัด 55
42	เป็นภาพวาดโดยใช้สีที่ผลิตจากอีพ็อกซีเรซิน 56
43	พลาสติกส่วนริมฝีปากของกันชนหน้าทำมาจาก โพลียูเรเทน 57
44	กาวซิลิโคน 57
45	โครงสร้างระบบของเครื่อง heat flux DSC(a) โครงสร้างระบบเครื่อง DTA (b) ระบบเครื่อง DTA ที่ออกแบบโดยบริษัท TA instruments (c) ระบบ เครื่อง DTA ที่ออกแบบโดยบริษัท Seiko instruments..... 60
46	แผนผังของระบบ DSC แบบชดเชยกำลัง (Perkin Elmer crop.) 62
47	ตัวอย่างเส้นกราฟ TG ที่มีกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเพียงขั้นเดียว 64

ภาพที่	หน้า
48	แก้วใส 11 ชนิดที่ใช้ในการวิจัย คือ (a) กระจกหน้ารถยนต์ (b) กระจก ประตูรถยนต์ (c) กระจกหน้าต่างใส (d) กระจกแผ่นเรียบใส (e) บีกเกอร์แก้วใส (f) แก้วน้ำใส (g) ขวดน้ำอัดลมใส (h) ขวดเหล้าใส (i) ขวดแก้วใส(j) จานแก้วใส และ(k) ชามแก้วใส 68
49	พลาสติกจากส่วนประกอบต่างๆของรถยนต์ A ที่ใช้ในการวิจัย (a) ชุดแต่ง ด้านข้างรถ (b) กันชนหน้ารถ (c) กรอบตะเบียงรถ (d) โคมไฟหน้า (e) พลาสติกของกระจกมองข้าง (f) เลนส์ไฟเลี้ยว (g) กรอบพลาสติก ของไฟหน้ารถ (h) แขนยึดกระจกมองข้าง และ(i) เลนส์ไฟหน้ารถ 69
50	พลาสติกจากส่วนประกอบต่างๆของรถ B ที่ใช้ในการวิจัย (a) กันชนหลังรถ (b) กันชนหน้ารถ (c) กรอบตะเบียงรถ (d) พลาสติกของกระจกมองข้าง (e) เลนส์ไฟเลี้ยว (f) กรอบพลาสติก ของไฟหน้ารถ (g) โคมไฟหน้า และ(h) เลนส์ไฟหน้า..... 70
51	เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย (a) ชุดเครื่องมือ TGA (b) ชุดเครื่องมือ Pyris Diamond DSC (c) ชุดเครื่องมือ 910 DSC (d) เครื่อง Refractometer (e) ชุดหลอดไพโซเดียม (f) กล้องจุลทรรศน์..... 72
52	ตำแหน่งต่างๆของ Refractometer 75
53	การจัดวางตำแหน่งของหลอดไพโซเดียม..... 76
54	เทอร์โมแกรมของพลาสติกกระจกมองข้าง B ที่ได้จากเทคนิค DSC..... 84
55	เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์โดยเทคนิค DSC ของพลาสติก กรอบตะเบียงรถ A 85
56	เทอร์โมแกรมแสดงการวิเคราะห์กรอบตะเบียงรถ A ด้วยเทคนิค TGA ของ พลาสติกตัวอย่าง 3h..... 86
57	เทอร์โมแกรมแสดงการวิเคราะห์โคมไฟหน้า B โดยเทคนิค TGA จากพลาสติก ตัวอย่าง 8t..... 87
58	เทอร์โมแกรม DSC ของชุดแต่งด้านข้างรถ (skirt) ตัวอย่าง 1h..... 119
59	เทอร์โมแกรม DSC ของกันชนหน้ารถ ตัวอย่าง 2h..... 120
60	เทอร์โมแกรม DSC ของกรอบตะเบียงรถ ตัวอย่าง 3h..... 121
61	เทอร์โมแกรม DSC ของโคมไฟหน้า ตัวอย่าง 4h..... 122

ภาพที่		หน้า
62	เทอร์โมแกรม DSC ของพลาสติกของกระจกมองข้าง ตัวอย่าง 5h.....	123
63	เทอร์โมแกรม DSC ของเลนส์ไฟเลี้ยว ตัวอย่าง 6h.....	124
64	เทอร์โมแกรม DSC ของกรอบพลาสติกของไฟหน้ารถ ตัวอย่าง 7h.....	125
65	เทอร์โมแกรม DSC ของแขนยึดกระจกมองข้าง ตัวอย่าง 8h.....	126
66	เทอร์โมแกรม DSC ของเลนส์ไฟหน้ารถ ตัวอย่าง 9h.....	127
67	เทอร์โมแกรม DSC ของกันชนหลังรถ ตัวอย่าง 1t.....	128
68	เทอร์โมแกรม DSC ของกันชนหน้ารถ ตัวอย่าง 2t.....	129
69	เทอร์โมแกรม DSC ของกรอบตะเบีย้นรถ ตัวอย่าง 3t.....	130
70	เทอร์โมแกรม DSC ของพลาสติกของกระจกมองข้าง ตัวอย่าง 5t.....	131
71	เทอร์โมแกรม DSC ของเลนส์ไฟเลี้ยว ตัวอย่าง 6t.....	132
72	เทอร์โมแกรม DSC ของกรอบพลาสติกของไฟหน้ารถ ตัวอย่าง 7t.....	133
73	เทอร์โมแกรม DSC ของโคมไฟหน้า ตัวอย่าง 8t.....	134
74	เทอร์โมแกรม DSC ของเลนส์ไฟหน้ารถ ตัวอย่าง 9t.....	135
75	เทอร์โมแกรม TGA ของชุดแต่งด้านข้างรถ (skirt) ตัวอย่าง 1h.....	137
76	เทอร์โมแกรม TGA ของกันชนหน้ารถ ตัวอย่าง 2h.....	138
77	เทอร์โมแกรม TGA ของกรอบตะเบีย้นรถ ตัวอย่าง 3h.....	139
78	เทอร์โมแกรม TGA ของโคมไฟหน้า ตัวอย่าง 4h.....	140
79	เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกของกระจกมองข้าง ตัวอย่าง 5h.....	141
80	เทอร์โมแกรม TGA ของเลนส์ไฟเลี้ยว ตัวอย่าง 6h.....	142
81	เทอร์โมแกรม TGA ของกรอบพลาสติกของไฟหน้ารถ ตัวอย่าง 7h.....	143
82	เทอร์โมแกรม TGA ของแขนยึดกระจกมองข้าง ตัวอย่าง 8h.....	144
83	เทอร์โมแกรม TGA ของเลนส์ไฟหน้ารถ ตัวอย่าง 9h.....	145
84	เทอร์โมแกรม TGA ของกันชนหลังรถ ตัวอย่าง 1t.....	146
85	เทอร์โมแกรม TGA ของกันชนหน้ารถ ตัวอย่าง 2t.....	147
86	เทอร์โมแกรม TGA ของกรอบตะเบีย้นรถ ตัวอย่าง 3t.....	148
87	เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกของกระจกมองข้าง ตัวอย่าง 5t.....	149
88	เทอร์โมแกรม TGA ของเลนส์ไฟเลี้ยว ตัวอย่าง 6t.....	150
89	เทอร์โมแกรม TGA ของกรอบพลาสติกของไฟหน้ารถ ตัวอย่าง 7t.....	151

ภาพที่		หน้า
90	เทอร์โมแกรม TGA ของโคมไฟหน้า ตัวอย่าง 8t.....	152
91	เทอร์โมแกรม TGA ของเลนส์ไฟหน้ารถ ตัวอย่าง 9t.....	153

สารบัญภาพประกอบ

แผนภูมิที่		หน้า
1	แผนภูมิความหนาแน่นเฉลี่ยของเศษแก้ว 11 ชนิด.....	80
2	แผนภูมิดัชนีหักเหเฉลี่ยของเศษแก้ว 11 ชนิด	82
3	แผนภูมิความหนาแน่นเฉลี่ยและดัชนีหักเหเฉลี่ยของเศษแก้ว 11 ชนิด	83
4	การพล็อตระหว่างอุณหภูมิของพลาสติกตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติ ทางความร้อนครั้งที่ 1 จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC และ TGA	91

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญ

รายการโทรทัศน์ ภาพยนตร์ หนังสือ และบทความต่างๆทางอินเทอร์เน็ต ที่เราได้พบเห็นอยู่ทุกวันนี้ มีการนำเสนอเนื้อหาเกี่ยวกับ นิติวิทยาศาสตร์ ไม่ว่าจะเป็นการตรวจสถานที่เกิดเหตุ การพิสูจน์หลักฐานต่างๆอย่างแพร่หลาย บุคคลทั่วไปมักพบเห็นหรือได้ยินได้ฟัง คำว่า พยานหลักฐานอยู่บ่อยครั้ง พยานหลักฐานมีความสำคัญต่อกระบวนการสืบสวนสอบสวนอย่างมาก โดยแบ่งออกได้ 3 ประเภท ดังนี้ พยานหลักฐานโดยตรงหรืออาจเรียกพยานบุคคล พยานแวดล้อม ภูมิ และพยานหลักฐานที่แท้จริงหรือพยานวัตถุทุกชนิด การที่คนจะประกอบความผิดโดยไม่ทิ้งร่องรอยพยานหลักฐานไว้ นั่นเป็นไปได้ยากมาก ปกติพยานหลักฐานที่จะช่วยนำคนผิดไปฟ้องลงโทษได้นั้นเป็นพยานบุคคลเสียเป็นส่วนใหญ่ แต่มีอยู่หลายกรณีที่ไม่สามารถหาพยานบุคคลได้ มีเพียงพยานวัตถุเท่านั้นที่พอจะหาได้ นอกจากนี้การใช้พยานบุคคลยังมีปัญหาต่อรูปคดี ปัจจุบันพยานวัตถุได้รับการยอมรับมากขึ้น เนื่องจากเทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์มีความเจริญก้าวหน้าขึ้น อุปกรณ์เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ได้รับการพัฒนาให้มีขีดความสามารถในการตรวจวิเคราะห์ด้วยความละเอียดสูง ทำให้พยานวัตถุมีคุณค่าดังนี้ พยานวัตถุเป็นสิ่งพิสูจน์ถึงการเกิดขึ้นจริงของคดี หรือพิสูจน์ว่ามีการกระทำผิดเกิดขึ้น สามารถเชื่อมโยงผู้ต้องสงสัยให้เข้ามาเกี่ยวข้องกับผู้เสียหาย หรือกับสถานที่เกิดเหตุ สามารถชี้ถึงตัวผู้กระทำความผิด สามารถป้องกันผู้บริสุทธิ์ที่ถูกกล่าวหาได้ สามารถยืนยันคำให้การของผู้เสียหาย สามารถทำให้เกิดการสารภาพหรือ ยอมรับการกระทำ ความผิด สามารถเชื่อถือได้มากกว่าประจักษ์พยาน เป็นต้น ดังนั้นพยานวัตถุจึงเป็นที่ยอมรับในระดับสากล

แก้วและพลาสติก เป็นวัสดุที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย พบเห็นได้ทั่วไปในชีวิตประจำวันตั้งแต่ตื่นนอนตอนเช้าจนกระทั่งเข้านอนตอนกลางคืน เช่น แก้วน้ำ จาน ชาม เครื่องประดับตกแต่งบ้าน เครื่องใช้สำนักงาน พาหนะยานยนต์ วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา ทดลอง อุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น เราจึงมักพบพยานวัตถุที่เป็นเศษแก้วหรือเศษพลาสติก

เกี่ยวข้องอยู่ในสถานที่เกิดเหตุหลากหลายกรณี เช่น ในกรณีเกิดอุบัติเหตุชนแล้วหนี โดยมีเศษชิ้นส่วนของรถที่เป็นแก้ว หรือพลาสติก ตกอยู่ในสถานที่เกิดเหตุ ซึ่งต่อมาตำรวจสามารถสกัดจับได้แล้วสงสัยว่าเป็นผู้ก่อเหตุหรือไม่ สามารถทำการพิสูจน์โดยนำชิ้นส่วนเหล่านี้มาตรวจเปรียบเทียบกับรถที่ต้องสงสัย หากพบว่าเป็นชิ้นส่วนเดียวกัน ก็สามารถใช้เป็นหลักฐานในการดำเนินคดีต่อไปได้ เป็นต้น ส่วนกรณีอื่นๆ เช่น คนร้ายทุบกระจกประตูรถยนต์เพื่อขโมยรถหรือเอาสิ่งของมีค่าในรถ หรือกรณีที่คนร้ายทุบกระจกหน้าต่างบ้านหรือกระจกบานเกร็ดเพื่อเข้าไปลักทรัพย์ในบ้าน หรือกรณีทะเลาะวิวาทใช้ขวดแก้วทำร้ายร่างกาย หรือกรณีรถชนเขี้ยวชนกัน เป็นต้น ซึ่งพบว่ามิดิตีที่เกิดขึ้นจริง ดังตัวอย่างคือ มีคนร้ายบุกเข้าไปทุบกระจกตู้บริจาคเงินของวัดป่าศรีสำราญ อ.เมือง จ.ศรีสะเกษ พร้อมทั้งได้ขโมยเงินในตู้บริจาคไปด้วยจำนวนหนึ่ง และหลบหนีออกจากบริเวณวัดไป เจ้าหน้าที่ตำรวจสามารถจับกุมคนร้ายได้ และทำการตรวจค้นตัวผู้ต้องหา พบเงินสดพร้อมเศษแก้วจำนวนหนึ่ง ซึ่งมีลักษณะตรงกับกระจกของตู้บริจาค ในกรณีต่างๆข้างต้นถ้ามีเศษแก้วหรือเศษพลาสติกติดไปกับร่างกาย เสื้อผ้า รองเท้า หรือเครื่องมือของคนร้าย เราสามารถใช้เศษแก้วหรือเศษพลาสติกที่ตรวจเก็บได้เหล่านี้มาใช้ในการระบุตัวคนร้าย หรือใช้ชี้ว่ามี ความเกี่ยวข้องระหว่างคนร้ายกับสถานที่เกิดเหตุได้

การตรวจพิสูจน์เศษแก้วสามารถทำได้ดังนี้ ประกอบชิ้นส่วนเศษแก้วของกลางเข้าร้อยกัน การตรวจสี ชนิดหรือประเภทของเศษแก้ว การตรวจหาความหนาแน่น การตรวจหาดัชนีหักเห การตรวจหาองค์ประกอบของธาตุ และการตรวจคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความหนาแน่นและดัชนีหักเหเฉลี่ยในเศษแก้ว 11 ชนิด ที่ไม่สามารถจำแนกออกด้วยตาเปล่า เพื่อวิเคราะห์ว่าใช้ในการจำแนกชนิดของเศษแก้วได้หรือไม่

ส่วนการตรวจพิสูจน์เศษพลาสติกสามารถทำได้ดังนี้ ประกอบชิ้นส่วนพลาสติกของกลางเข้าร้อยกัน การตรวจสี ชนิดหรือประเภทของพลาสติก การตรวจคุณสมบัติทางความร้อนของพลาสติก และการตรวจความเสถียรของพลาสติก เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อน และการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักในเศษชิ้นส่วนพลาสติกจากองค์ประกอบต่างๆของรถยนต์ เมื่อได้รับความร้อน เพื่อวิเคราะห์ว่าใช้ในการจำแนกชนิดของเศษชิ้นส่วนพลาสติกได้หรือไม่

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาค่าความหนาแน่นและดัชนีหักเหของเศษแก้วตัวอย่างจำนวน 11 ชนิด

2. เพื่อนำค่าความหนาแน่นและดัชนีหักเหเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์มาใช้ในการจำแนกชนิดของเศษแก้ว

3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนและการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเศษชิ้นส่วนพลาสติกจากองค์ประกอบต่างๆของรถยนต์

4. เพื่อนำคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนและการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่ได้จากการวิเคราะห์มาใช้ระบุชนิดของเศษพลาสติก

สมมติฐานของการวิจัย

1. เศษแก้วที่ได้จากกระบวนการผลิตต่างกัน จะมีความหนาแน่นและดัชนีหักเหต่างกัน
2. ชนิดของพลาสติกจากองค์ประกอบต่างๆของรถยนต์ที่แตกต่างกันมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนและการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก เมื่อได้รับความร้อนแตกต่างกัน

ขอบเขตของการวิจัย

1. เศษแก้วที่ทำการศึกษา นำมาจากเศษแก้ว 11 ชนิด ที่ไม่สามารถจำแนกออกได้ด้วยตาเปล่า คือ กระจกหน้ารถยนต์ กระจกแผ่นเรียบใส ขวดแก้วใส กระจกประตูรถยนต์ บีกเกอร์ใส แก้วน้ำใส ขวดน้ำอัดลมใส ขวดเหล้าใส กระจกหน้าต่างใส จานแก้วใส และชามแก้วใส

2. การหาดัชนีหักเหของเศษแก้วและสารเคมี จะทำการวัดที่อุณหภูมิ 25 °C ใช้แหล่งกำเนิดแสงโซเดียม D line ความยาวคลื่น 589 nm โดยสารเคมีที่ใช้มี 9 ชนิด คือ Dichloromethane, Cyclohexanol, Ethyl Benzoate, Pyridine, Methyl Benzoate, Anisole, Methyl Salicylate, Benzyl Alcohol และ m-cresol

3. ชิ้นส่วนพลาสติกที่นำมาจากส่วนต่างๆของรถ โดยมีบริษัท A เป็นผู้ผลิต มีดังนี้ ชุดแต่งด้านข้างรถ (skirt) กันชนหน้ารถ กรอบตะเบียงรถ โคมไฟหน้า พลาสติกของกระจกมองข้างเลนส์ไฟเลี้ยว กรอบพลาสติกของไฟหน้ารถ แชนยัดกระจกมองข้าง และเลนส์ไฟหน้ารถ

4. ชิ้นส่วนพลาสติกที่นำมาจากส่วนต่างๆของรถที่มีบริษัท B เป็นผู้ผลิต มีดังนี้ กั้นชนหลังรถ กั้นชนหน้ารถ กรอบตะเบียนรถ พลาสติกของกระจกมองข้าง เลนส์ไฟเลี้ยว กรอบพลาสติกของไฟหน้ารถ โคมไฟหน้า และเลนส์ไฟหน้ารถ

ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เก็บรวบรวมตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย
3. เตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย
4. เก็บรวบรวมข้อมูลผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง
5. สรุปผลพร้อมข้อเสนอแนะ
6. นำเสนอผลการศึกษา

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ความหนาแน่นของวัตถุ คือ มวลของวัตถุนั้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ดังนั้น ความหนาแน่นเขียนเป็นสูตรได้ว่า $D = m/V$ เมื่อ D คือ ความหนาแน่นของวัตถุ มีหน่วยเป็น kg/m^3 , m คือ มวลของวัตถุ มีหน่วยเป็น kg และ V คือ ปริมาตรของวัตถุ มีหน่วยเป็น m^3

2. ดัชนีหักเหของแสง คือ อัตราส่วนของความเร็วแสงที่เดินทางผ่านสุญญากาศ กับความเร็วของแสงที่เดินทางผ่านวัสดุตัวกลาง นั่นคือ ดัชนีหักเหของแสง (n) สามารถเขียนเป็นสูตรได้คือ $n = c/v$ โดยที่ c คือ ความเร็วแสงเมื่อเดินทางผ่านสุญญากาศ มีหน่วยเป็น m/s และ v คือความเร็วของแสงที่เดินทางผ่านวัสดุตัวกลางนั้น มีหน่วยเป็น m/s

3. Becke lines นิยามว่าเป็นแถบมืดหรือแถบสว่าง เนื่องจากการหักเหหรือการเลี้ยวเบนของแสง ทำให้เกิดภาพที่ขอบระหว่างตัวกลางที่มีความยาวของทางเดินของแสงแตกต่างกัน เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเลนส์ใกล้วัตถุกับวัตถุ Becke lines จะเคลื่อนย้ายไปในทิศทางที่มีความยาวของทางเดินของแสงมากกว่า และเส้น Becke line จะหายไป หากวัตถุอยู่ในตำแหน่งโฟกัสที่ถูกต้อง

4. พลาสติก A หมายถึง พลาสติกจากส่วนต่างๆของรถยนต์ที่มีบริษัท A เป็นผู้ผลิต ซึ่งบริษัท A แตกต่างจากบริษัท B เช่น กรอบทะเบียนรถ A มีความหมายว่า กรอบทะเบียนรถที่ผลิตโดยบริษัท A เป็นต้น

5. พลาสติก B หมายถึง พลาสติกจากส่วนต่างๆของรถยนต์ที่มีบริษัทผู้ผลิต B เป็นผู้ผลิต โดยที่บริษัทผู้ผลิต B แตกต่างจากบริษัทผู้ผลิต A เช่น เลนส์ไฟเลี้ยว B มีความหมายว่า เลนส์ไฟเลี้ยวที่ผลิตโดยบริษัท B เป็นต้น

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. เพื่อเป็นองค์ความรู้แก่เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องกับนิติวิทยาศาสตร์ ในการนำไปใช้ตรวจวิเคราะห์เปรียบเทียบหรือการเก็บพยานวัตถุ
2. เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการสืบสวนสอบสวนของเจ้าหน้าที่ตำรวจ
3. เพื่อเป็นฐานข้อมูลจากการหาค่าความหนาแน่นเฉลี่ยและดัชนีหักเหเฉลี่ยของแก้วใส 11 ชนิด
4. เพื่อเป็นฐานข้อมูลจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC และ TGA ของชิ้นส่วนรถยนต์ที่เป็นส่วนประกอบภายนอก

บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาทฤษฎีจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยสามารถจำแนกออกเป็นหัวข้อต่างๆได้ดังนี้

1. ประวัติและวิวัฒนาการของแก้ว
2. การหักเหของแสง
3. หลักการของ Becke line
4. วัสดุพลาสติก
5. การวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal Analysis)
6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ประวัติและวิวัฒนาการของแก้ว

แก้ว (glass) เป็นวัตถุโปร่งใสที่มีเนื้อใสสะอาดและมีสีหลายสี ถ้าย้อนกลับไปในยุคประวัติศาสตร์เราจะพบว่าชาวอียิปต์เป็นชนชาติแรกๆ ที่รู้จักนำแก้วมาผลิตเป็นภาชนะใช้ในครัวเรือน รวมทั้งใช้เป็นเครื่องประดับตามร่างกาย เช่น ลูกปัด กำไลมือ เป็นต้น ต่อมาในยุคต้นคริสต์ศตวรรษที่ 1 ตามบันทึกประวัติศาสตร์เล่าว่า ได้มีนักเดินเรือชาวฟินิเซียน ได้บรรทุุก่อนโซดามาเต็มลำเรือ ขณะที่เขาปรุงอาหารและนำเอาหม้อโลหะที่กำลังร้อนมากวางลงบนก้อนโซดา ซึ่งมีทรายติดปะปนอยู่ด้วยนั้น ปรากฏว่าทั้งก้อนโซดาและทรายได้ละลายหลอมตัวเข้าหากันเป็นก้อนวัตถุโปร่งใส และนั่นก็เป็นจุดเริ่มต้นของอุตสาหกรรมการผลิตแก้วในเวลาต่อมา

1.1 การกำเนิดแก้ว

แก้วเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของแมกมาที่พุ่งออกมาจากปล่องภูเขาไฟ โดยเมื่อนำแมกมามาหลอมละลายที่ผิวด้วยความร้อนสูง ก็จะได้ก้อนวัตถุที่ใสซึ่งมีส่วนประกอบหลักของทรายแก้ว (silicon dioxide, SiO_2) จับตัวกันเป็นก้อนเรียกว่า หินควอตซ์ หรือหินเขียวหนุมาน (quartz) และจะพบได้มากบริเวณที่มีสารคาร์บอนเนต (chalk) (กวี หวังนิเวศน์กุล 2552 : 150-151) มากๆ เช่น บริเวณหน้าผาชายทะเล ซึ่งเมื่อถูกคลื่นซัดบ่อยๆ ก็แตกตกลงมาเป็นเม็ดเล็กๆ แต่ใช้เวลานับพันๆปี สำหรับในเมืองไทยพบได้แถบชายทะเล จ.สงขลา หรือที่เกาะเสม็ด จ.ระยอง เป็นต้น

แก้วนั้นถูกทำขึ้นครั้งแรกในดินแดนเมโสโปเตเมีย หรืออียิปต์ เมื่อหลายพันปีก่อนคริสต์ศักราช แต่แก้วได้รับความนิยมนำมาใช้สอยกันกว้างขวางเมื่อราว 3,500 ปีมานี้เอง แก้วในสมัยโบราณมีความแตกต่างจากแก้วในสมัยปัจจุบันนี้มาก ชาวเมโสโปเตเมียและชาวอียิปต์มีวิธีการทำแก้วอยู่ 2 วิธีด้วยกันคือ วิธีแรกนั้นใช้แม่พิมพ์ที่ข้างในทำด้วยทรายแล้วจึงหุ้มด้วยแก้วที่หลอมละลาย ส่วนวิธีที่ 2 นั้นต้องใช้แม่พิมพ์ 2 อันวางซ้อนกันด้านนอกใหญ่กว่า เว้นช่องระหว่างแม่พิมพ์ทั้งสองไว้ แล้วเทน้ำแก้วลงไป (พิภพ สุนทรสมัย 2536 : 219)

1.2 การคิดค้นการเป่าแก้ว

ในยุคจักรวรรดิโรมัน ราว 30 ปีก่อนคริสต์ศักราชถึงคริสต์ศักราชที่ 395 ได้มีการนำเทคนิคการเป่าแก้วมาใช้ วิธีนี้ทำได้โดยการนำท่อเหล็กกลงจุ่มลงไปใต้น้ำแก้วที่หลอมละลาย น้ำแก้วจะติดที่ปลายท่อเหล็ก จากนั้นก็เป่าท่อเหล็กที่ปลายท่ออีกด้านหนึ่งทำให้แก้วจะพองออกคล้ายลูกโป่ง การขยายตัวออกในลักษณะนี้ทำให้แก้วมีเนื้อที่ผิวหน้าสัมผัสอากาศมากยิ่งขึ้น มีผลทำให้แก้วซึ่งเดิมอยู่ในลักษณะแก้วเหลวที่มีอุณหภูมิถึงราว $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ นี้เย็นลง และแข็งตัวได้อย่างรวดเร็ว (พิภพ สุนทรสมัย 2536 : 219)

เครื่องแก้วชิ้นเล็ก ๆ จะเย็นตัวลง และแข็งตัวภายในเวลา 2-3 นาที ส่วนเครื่องแก้วที่มีชิ้นใหญ่กว่าจะใช้เวลาเพียง 10 นาทีเท่านั้น ซึ่งหมายความว่า การผลิตแก้วเป็นจำนวนมาก ๆ ในยุคปัจจุบันมีประสิทธิภาพกว่าในยุคก่อน

1.3 กำเนิดกระจกแผ่น

ความก้าวหน้าในการผลิตกระจกแผ่นเป็นผลมาจากการที่กระจกเงาแบบฝรั่งเศสได้รับความนิยอย่างสูงสุด และช่วยทำให้การผลิตกระจกแผ่นแบบอุตสาหกรรม หรือการผลิตกระจกในปริมาณมากเป็นไปได้อย่างสะดวก

การผลิตกระจกแผ่นนั้น เริ่มต้นครั้งแรกราวศตวรรษที่ 7 โดยชาวซีเรีย ซึ่งได้คิดค้นและพัฒนาระบบการผลิตกระจกขึ้นมา คือ การผลิตโดยวิธีการซึ่งเหมาะสำหรับการผลิตกระจกขนาดเล็ก เพราะขนาดของกระจกที่ผลิตได้จะมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 36-40 in เท่านั้น

ความต้องการกระจกขนาดใหญ่เริ่มมีมากขึ้น การค้นคว้าและการพัฒนาเพื่อหาวิธีการผลิตกระจกแผ่นดังกล่าวประสบความสำเร็จในปีค.ศ. 1688 โดยชาวฝรั่งเศส ชื่อ Lucas De Nehou ทำการผลิตกระจกโดยวิธี Table Casting Process วิธีการก็คือ นำน้ำแก้วที่หลอมละลายเทลงบนพื้นโต๊ะที่ปูด้วยแผ่นโลหะ จากนั้นก็รีดหรือทับด้วยลูกกลิ้งเหล็กแล้วนำไปขัดผิวอีกครั้งหนึ่ง

ในราวปีค.ศ. 1800 ได้มีการนำเอาวิธีการผลิตกระจกแผ่นโดยวิธี Cylinder Blown Process ซึ่งคิดค้นได้ในราวปี ค.ศ. ที่ 11 ได้นำกลับมาใช้อีกครั้งหนึ่ง

ในช่วงศตวรรษที่ 20 ประเทศสหรัฐอเมริกาได้กลายมาเป็นประเทศที่เด่นมากในการผลิตกระจกแผ่นที่มีความแพร่หลายมาจากทางยุโรป การพัฒนาและการคิดค้นหาได้หยุดแต่เพียงแค่นั้นไม่ ในปีค.ศ. 1913 Emile Fourcault ชาวเบลเยียมได้คิดค้นการผลิตกระจกแผ่นขึ้นมา โดยการดึงน้ำแก้วที่กำลังหลอมอยู่ในเตาเป็นแผ่นขึ้นมาตามแนวตั้ง (Vertical Drawing Method) จึงเรียกวิธีนี้ว่า Fourcault Process และในปีค.ศ. 1916 Irving W. Colburn ชาวสหรัฐอเมริกาได้พัฒนาและดัดแปลงวิธีการ Fourcault Process เสียใหม่ โดยการเปลี่ยนแปลงในส่วนของการดึงขึ้นตามแนวตั้งให้มีการหักโค้งไปตามแนวราบหลังจากที่ถูกดึงขึ้นประมาณ 2-3 ft วิธีการนี้เรียกว่า Colburn Process กระจกที่ได้จากการผลิตตามวิธีดังกล่าว โดยทั่วไปเรียกว่า “กระจกซีท” และต่อมาก็มีการคิดค้นการผลิตกระจกโดยผ่านลูกกลิ้ง เพื่อผลิตกระจกแผ่นชนิดหนา และกระจกชนิดมีดอกกลวดลายกระจกกลวด ซึ่งเป็นที่นิยมแพร่หลายในปัจจุบัน (พิภพ สุทรสมัย 2536 : 219-220)

1.4 ชนิดและประเภทของแก้ว

แก้ว ตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2542 ได้ให้ความหมายไว้ว่า แก้วคือของที่ได้จากการใช้ทรายขาวเป็นส่วนประกอบสำคัญมาหลอมกับสารที่มีสมบัติเป็นด่าง เช่น ออกไซด์ของโซเดียม, ออกไซด์ของแคลเซียม แล้วมีลักษณะเช่นนั้น ส่วนแก้วตามมาตรฐานของ ASTM หมายถึง การนำวัสดุที่เป็นสารอนินทรีย์ต่างๆ มาเผาให้ถึงจุดละลายที่อุณหภูมิสูง และเมื่อเย็นตัวลงจะไม่ตกผลึก (กวี หวังนิเวศน์กุล 2552 : 150)

นักเคมีได้ผลิตแก้วให้เป็นสิ่งประดิษฐ์สำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย เช่น ในอุตสาหกรรมครัวเรือน ประดิษฐ์เป็นแก้วน้ำ ขวดน้ำ จานแก้ว โต๊ะรับแขก เป็นต้น ในอุตสาหกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ประดิษฐ์เป็นหลอดไฟฟ้า หลอดไฟวิทยุหรือโทรทัศน์ กระจกโทรทัศน์ หน้าปัดนาฬิกา เป็นต้น ส่วนในอุตสาหกรรมงานก่อสร้าง ก็ได้นำแก้วมาผลิตเป็นกระจกสำหรับประตูหน้าต่าง กระจกบานใหญ่หรือกระจกที่ติดตั้งกับอาคารสูงๆ เป็นกระจกชนิดนิรภัย นอกจากนี้ยังมีกระจกกันกระสุน กระจกทนไฟ กระจกสำหรับรถยนต์ แก้วที่ใช้ในงานอวกาศ กระจกหลากสีใช้ในงานตกแต่ง เช่น ในโบสถ์ต่างๆ และแก้วเจียรไนสำหรับตกแต่งร่างกายหรือแฟชั่นโชว์ เป็นต้น

ผลิตภัณฑ์แก้วสามารถที่จะแบ่งแยกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ดังนี้ คือ

1.4.1 ผลิตภัณฑ์เครื่องแก้ว ได้แก่

1.4.1.1 ภาชนะเครื่องแก้วที่ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น แก้ว ขวด เป็นต้น

1.4.1.2 แก้วสำหรับใช้ในห้องทดลอง และในด้านการแพทย์ เช่น แก้วทนไฟ หลอดยา

1.4.1.3 แก้วสำหรับงานไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ เช่น หลอดไฟ หลอดวิทยุ

1.4.1.4 แก้วสำหรับงานทางด้านทัศนศาสตร์ เช่น เลนส์ และงานอื่นๆ

1.4.2 ผลิตภัณฑ์กระจกแผ่น ได้แก่

1.4.2.1 กระจกซีท (Sheet Glass)

1.4.2.2 กระจกโฟลท (Float Glass)

1.4.2.3 กระจกขัดผิว (Polished Glass)

1.4.2.4 กระจกดอกกลวกลาย (Figured Glass)

1.4.2.5 กระจกลวด (Wired Glass)

1.4.2.6 กระจกตัดแสง (Heat Absorbing Glass)

1.4.2.7 กระจกสะท้อนแสง (Heat Reflecting Glass)

1.4.2.8 กระจกนิรภัยหลายชั้น (Laminated Safety Glass)

1.4.2.9 กระจกนิรภัยเทมเปอร์ (Tempered Safety Glass)

1.4.2.10 กระจกฉนวน (Sealed insulating Glass)

1.4.2.11 กระจกเงา (Mirror)

1.4.2.12 และอื่น ๆ

1.4.3 ผลิตภัณฑ์ใยแก้ว ได้แก่ Continuous Fibers, Short Fiber, Optical Fiber และ Alkali-Resistant Fiber

1.5 วัตถุดิบที่ใช้ประโยชน์ในการผลิตกระจก

วัตถุดิบหลักที่ใช้ประโยชน์ในการผลิตกระจกแผ่นเรียบนั้น ได้แก่ ททรายแก้ว โซดาแอช หินปูน โซเดียมซัลเฟตหรือหินฟอสเฟต หินโดโลไมท์ และเศษกระจก ซึ่งกว่าร้อยละ 80 เป็นวัตถุดิบที่มีอยู่แล้วภายในประเทศไทย นอกจากนี้ยังมีสารอื่นที่ใส่เพิ่มลงไป เพื่อทำให้เกิดสีในการผลิตกระจกสี ได้แก่ ออกไซด์ของธาตุต่างๆ เช่น เหล็ก นิกเกิล และโคบอลต์

สำหรับเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ในการผลิตกระนั้น แต่เดิมใช้ถ่านหิน ต่อมาจึงเปลี่ยนมาใช้ น้ำมันเตาแทนเมื่อประมาณ 30 ปีที่แล้วจนกระทั่งปัจจุบัน

1.5.1 ส่วนผสมของวัตถุดิบ

สัดส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกระจกแผ่นนั้น อาจจำแนกเป็นอัตราส่วนร้อยละได้ ดังนี้ (พิภพ สุนทรสมัย 2536 : 220)

ทรายแก้ว	45.5%
เศษกระจก	27.3%
โซดาแอช	11.8%
หินฟันม้า	9.7%
หินปูน	3.1%
หินโคลโลไมท์	1.4%
โซเดียมซัลเฟต	1.2%

1.5.2 คุณสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกระจก

1.5.2.1 ทราย ทรายที่จะนำมาใช้ในการทำแก้วนี้ ได้มาจากแหล่งวัตถุดิบที่จังหวัด ระยอง อำเภอแกลง บริเวณช่องระหว่างแหลมแม่พิมพ์ กับวังแก้ว ซึ่งตามข้อกำหนดของโรงงาน จะต้องเป็นทรายที่มีซิลิกามากกว่า 99.4% และมีเหล็กออกไซด์น้อยกว่า 0.06% สำหรับปริมาณ ความชื้นที่มีอยู่ในทรายยังไม่ได้กำหนดเป็นปริมาณความชื้นที่แน่นอน เมื่อใช้การผสมแบบธรรมดา แต่เมื่อนำมาใช้กับโรงผสมแบบอัตโนมัติจะต้องมีความชื้นไม่มากกว่า 5% ทรายที่ใช้จะต้องมีสี ก่อนข้างขาว เป็นเม็ดละเอียดผ่านตระแกรงร้อนมาตรฐานเบอร์ 100 (พิภพ สุนทรสมัย 2536 : 220)

1.5.2.2 โซดาแอช (soda ash) เกิดจากการนำเอาหินปูน (limestone) เกลือ (salt) และแอมโมเนีย (ammonia) มาผสมกัน ซึ่งในทางเคมีเรียกว่าเป็นการผสมระหว่างโซเดียมไบ

คาร์บอเนตกับโซเดียมคาร์บอเนต โซดาแอชใช้เป็นส่วนประกอบของแก้วเพื่อช่วยลดอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวของซิลิกาให้ต่ำลง (กวี หวังนิเวศน์กุล 2552 : 151)

1.5.2.3 โซเดียมซิลิเกต จะให้ Na_2O เป็นประมาณ 43% และบางที่อาจพบว่ามีเหล็กมากกว่าปกติ ช่วยป้องกันการแยกชั้นที่ผิวเรียกว่า silica scum หรือ layer of silica ไล่ฟองอากาศ (พิภพ สุทรสมัย 2536 : 221)

1.5.2.4 หินโดโลไมท์ ประกอบด้วยแร่โดโลไมท์ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) เป็นส่วนใหญ่ หินพวกนี้มักเกิดจากการที่มีสารละลาย ซึ่งมีแมกนีเซียมผสมอยู่เข้าไปทำปฏิกิริยากับหินปูน ทำให้เกิดเป็นโดโลไมท์ขึ้นมา มีเพียงเล็กน้อยที่เกิดจากการตกตะกอนทางเคมี (พิภพ สุทรสมัย 2536 : 221)

1.5.2.5 หินปูน (limestone) ประกอบด้วยแร่แคลไซต์ (CaCO_3) เป็นส่วนใหญ่ หินปูนเกิดในน้ำทะเลเป็นหินเนื้อละเอียดอาจเกิดโดยกรรมวิธีทางอนินทรีย์เคมี หรือทางอินทรีย์เคมี คือมีสิ่งมีชีวิตเป็นตัวช่วยก็ได้ บางครั้งก็อาจเป็นเม็ดผสมอยู่ (clastic texture) หินปูนบางชนิดอาจประกอบด้วยซากพืช ซากสัตว์ทับถมกันอยู่ เช่น ชอล์ก (chalk) เกิดจากสัตว์เซลล์เดียวทับถมกัน และแข็งตัวเป็นหินโดควาย เกิดจากเปลือกหอยหรือสัตว์อื่นๆ มีขนาดใหญ่ทับถมกัน นอกจากนี้ หินปูนยังอาจเกิดในน้ำจืด เช่น ตามลำธาร ตามถ้ำหินปูน เรียกว่าหินปูนน้ำจืด (dripstone) คุณสมบัติมีประกายเหมือนแก้ว หรือมุก แนวแตกสามทิศทางตั้งฉากทำมุม 75° และ 105° เป็นฟองฟูเมื่อเกิดกรดเกลืออาจ พบเป็นก้อน เนื้อแน่น หรือเป็นรูปขนมเป็ยกปูนอันเกิดจากแนวแตกทั้งสาม หรือเป็นรูปผลึกคล้ายฟัน หินปูนใช้เป็นสารที่เติมในแก้วเพื่อช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมละลายของซิลิกาให้ต่ำลงเช่นเดียวกับโซดาแอช แต่ถ้าใช้เฉพาะซิลิกาและโซดาแอชแล้ว จะได้แก้วที่มีความเปราะมาก หินปูนจึงเป็นตัวเสริมเพื่อช่วยลดความเปราะของแก้วนั้นลง (พิภพ สุทรสมัย 2536 : 221)

1.5.2.6 เฟลด์สปาร์ เป็นชุดของแร่ที่พบมากที่สุดในโลก คือ มีถึง 60% ของแร่ทั้งหมดบนเปลือกโลก คุณสมบัติ เฟลด์สปาร์ประกอบอยู่ในแร่ ออร์โทเครส ไมโครไลท์ สีขาว (เหลือง) จางๆ ครีมน ชมพู เขียว มีประกายใสเหมือนแก้ว แนวการแตกสองทิศทางตั้งฉากกัน โดยมากเกิดเป็นก้อนๆ เนื้อแน่น บางทีก็เกิดเป็นรูปผลึกสั้นๆ ผิวของแนวแตกเรียบเป็นรูปสี่เหลี่ยม

ผืนผ้า ในการผลิต เฟลด์สปาร์เป็นวัตถุดิบตัวหนึ่งที่เป็นแหล่งของอลูมินา ซึ่งเป็นแหล่งสำคัญมากที่สุดในการนำมาหลอมระหว่างอุณหภูมิ 1,100 – 1,200 °C เฟลด์สปาร์มีสูตรทั่วไป คือ $R_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_3$ โดยที่ R_2O จะเป็นพวก alkali oxide เช่น K_2O ซึ่งมีอยู่ใน microcline หรือ Na_2O ใน albit (พิภพ สุนทรสมัย 2536 : 221) นอกจากนี้ยังมี sodium และ potassium ในรูปอื่น ซึ่งนำมาใช้ในการผลิต

1.5.3 สารเติมเพื่อให้เกิดแก้วในรูปต่างๆ

สารที่ใส่เติมนี้จัดอยู่ในพวกคาร์บอเนตซัลเฟต ซึ่งเมื่อสารเหล่านี้ถูกความร้อนก็จะสลายตัวให้ออกไซด์เหลืออยู่ในเนื้อแก้ว (กวี หวังนิเวศน์กุล 2552 : 151) ประกอบด้วย

1.5.3.1 สารที่เป็นตัวฟอกสีทำให้ออกไซด์ เช่น ซาตุซีลีเนียม (Se), โคบอลต์ออกไซด์ (Co_2O_3), แมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2)

1.5.3.2 สารที่เป็นตัวช่วยเร่งการหลอมละลาย เช่น บอแรกซ์ ($Na_2B_4O_7$), แบไรต์ ($BaSO_4$), ฟลูออรีสปาร์ (CaF_2) และเศษแก้ว (cullet)

1.5.3.3 สารที่เป็นตัวไล่ฟองแก๊ส เป็นแก๊สที่เกิดจากการสลายตัวของวัตถุดิบต่างๆ เช่น ซัลเฟต (SO_2), แอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)_2SO_4$), น้ำ (H_2O) และเกลือแกง (NaCl)

1.5.3.4 สารที่เป็นตัวไล่ออกซิเจน เช่น โซเดียมไนเตรด ($NaNO_3$)

1.5.4 สารเติมเพื่อให้ออกไซด์สีต่างๆ

การที่ทำให้แก้วหรือกระจกเกิดสีต่างๆนั้น ก็เพื่อความสวยงาม เพื่อกรองแสง เพื่อแทนสัญลักษณ์ เป็นต้น (กวี หวังนิเวศน์กุล 2552 : 151-152) โดยสารที่ทำให้เกิดสีขึ้นในแก้วจะประกอบด้วย

1.5.4.1 สีชา สารเติมคือ ถ่านกำมะถันและสนิมเหล็ก (Fe_2O_3)

1.5.4.2 สีแดง สารเติมคือ แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) และซีลีเนียม (Se) หรือ คิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O) หรือทองคลอไรด์

1.5.4.3 สีเขียว สารเติมคือ โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3)

1.5.4.4 สีเหลือง สารเติมคือ แคลเซียมซัลไฟด์, ยูเรเนียม (U)

1.5.4.5 สีนํ้าเงิน สารเติมคือ โคบอลต์ออกไซด์ (Co_2O_3)

1.5.4.6 สีม่วง สารเติมคือ แมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2)

1.5.4.7 สีชมพู สารเติมคือ แมงกานีส (Mn)

1.5.4.8 สีนํ้าตาล สารเติมคือ นิกเกิล (Ni)

1.5.5 สารเติมเพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติ

สารเติมเหล่านี้ใส่ไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของแก้วให้ดีขึ้น หรือให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ (กวี หวังนิเวศน์กุล 2552 : 152) เช่น

1.5.5.1 เพิ่มความคงทนให้กับแก้ว สารเติมคือ อะลูมินา (Al_2O_3)

1.5.5.2 ลดความหนืดของแก้ว สารเติมคือ ฟลูออรีนสปาร์ (CaF_2)

1.5.5.3 ช่วยให้การตกผลึกเป็นไปอย่างช้าๆ และเรียงตัวได้สวยงาม สารเติมคือ โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)

1.5.5.4 ช่วยให้แก้วมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ สารเติมคือ บอริกออกไซด์ (B_2O_3)

1.5.5.5 ช่วยให้แก้วคงรูปเร็วขึ้น สารเติมคือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

1.5.5.6 ช่วยเพิ่มอุณหภูมิจุดหลอมเหลวให้สูงขึ้น สารเติมคือ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O), ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น

1.6 กรรมวิธีการผลิตแก้ว

กรรมวิธีการผลิตแก้วแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน (กวี หวังนิเวศน์กุล 2552 : 152-153) ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมส่วนผสม เริ่มจากการลำเลียงทรายแก้วที่ผ่านการคัดเลือกคุณสมบัติทั้งทางฟิสิกส์และเคมีแล้ว ไปเข้าตะแกรงร่อนเพื่อคัดแยกสิ่งสกปรกออกไป จากนั้นลำเลียงไปเก็บไว้ในยูนึ่ง (silo) สำหรับหินปูนหรือปูนขาวก็ดำเนินการเช่นเดียวกับทรายแก้ว เมื่อถึงเวลาต้องการผลิตก็จะเปิดยูนึ่งให้ทรายแก้ว หินปูน และวัตถุดิบอื่นๆ ลำเลียงผ่านไปเข้าเครื่องผสม โดยมีการชั่งน้ำหนักตามสัดส่วนอัตโนมัติ เมื่อผสมคลุกเคล้ากันได้อย่างดีแล้วก็พร้อมที่จะลำเลียงเข้าเตาหลอมไป

ขั้นตอนที่ 2 เข้าสู่เตาหลอม ป้อนส่วนผสมเข้าเตาหลอม เตาเผาก่อด้วยอิฐทนไฟ เเผาด้วยน้ำมันเตาหรือแก๊สด้วยอุณหภูมิสูงประมาณ 1,500 - 1,600 °C จนส่วนผสมเริ่มละลายกลายเป็นน้ำแก้วใสๆ เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวที่จะก่อให้เกิดออกไซด์ของอนินทรีย์สารและแก๊ส แก๊สที่เกิดขึ้นจะไหลเข้าไปสู่ห้องไล่แก๊ส น้ำแก้วหรือเนื้อแก้วที่ปราศจากฟองแก๊สแล้วก็จะไหลลงสู่กันเตา และไหลไปสู่ห้องปรับอุณหภูมิ โดยค่อยๆลดอุณหภูมิลงจนเหลือประมาณ 800 – 1,000 °C เพื่อให้ น้ำแก้วเริ่มมีความหนืดสำหรับการขึ้นรูปต่อไป

ขั้นตอนที่ 3 การขึ้นรูปพรรณ น้ำแก้วที่หนืดพอเหมาะแล้วก็จะไหลไปตามรางที่ทำด้วยอิฐทนไฟ ผ่านห้องควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามต้องการ แล้วไหลออกมาเข้าสู่เครื่องจักรแม่พิมพ์รูปร่างต่างๆ แต่ถ้าเป็นกระจกก็จะไหลผ่านเครื่องวัดความหนา เพื่อกำหนดความหนาตามที่ต้องการ จากนั้นก็จะไหลไปตามสายพานลำเลียงเพื่อส่งเข้าเครื่องอบต่อไป

ขั้นตอนที่ 4 การอบ ผลิตภัณฑ์แก้วที่ขึ้นรูปเสร็จแล้วจะถูกลำเลียงเข้าไปผ่านห้องควบคุมอัตราการเย็นตัวของเนื้อแก้ว ควบคุมให้ลดลงอย่างสม่ำเสมอ เพื่อป้องกันการแตกร้าวอันเนื่องมาจากความเครียด สำหรับกระจกเมื่อผ่านขั้นตอนการอบแล้ว จึงจะนำไปล้าง เป่าให้แห้ง และสามารถตัดให้ได้ขนาดแผ่นตามที่ต้องการต่อไป

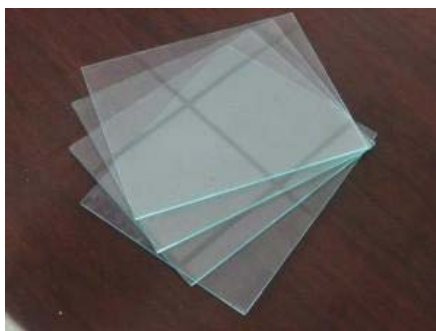
ขั้นตอนที่ 5 การปรับแต่ง ผลิตภัณฑ์แก้ว เช่น ขวดน้ำอัดลม เครื่องแก้ว เครื่องเรือนต่างๆ ก็จะนำไปสู่การตรวจสอบคุณภาพและปรับแต่งโดยการเจียรระไนต่อไป สำหรับกระจกก็จะ

ผ่านการตรวจสอบในด้านความหนา ขนาดของแผ่น การต้านทานแรงปะทะ รอยขีดข่วน การลบมูม เป็นต้น ก่อนส่งมอบลูกค้าต่อไป

1.7 ชนิดของกระจกแผ่น

กระจกแผ่นที่ถูกผลิตขึ้นมานั้นได้รับการพัฒนาเพื่อการตอบสนองต่อความต้องการที่เพิ่มมากขึ้นและแตกต่างกันออกไป ทั้งประโยชน์ใช้สอยและรูปแบบของกระจก คือ

1.7.1 กระจกซีท เป็นกระจกแผ่นเรียบที่นิยมใช้มากที่สุด และมีประวัติการใช้ยาวนานที่สุด กระจกชนิดนี้เป็นสิ่งที่ทุกคนจะต้องพบเห็นอยู่ในชีวิตประจำวัน เนื่องจากเป็นกระจกที่นิยมใช้กับหน้าต่างในอาคารบ้านเรือน และเครื่องเรือนหรือทำกรอบรูป เป็นต้น นอกจากนี้ยังนำมาขัดฝ้าที่ผิว เรียกว่า กระจกฝ้า เพื่อใช้เป็นฝ้ากั้นห้องหรือเครื่องตกแต่งบ้านเรือนในบางส่วนที่ต้องการเฉพาะแสงสว่าง แต่ไม่ต้องการให้มองเห็นทะลุผ่านอีกด้วย (พิภพ สุนทรสมัย 2536 : 224)

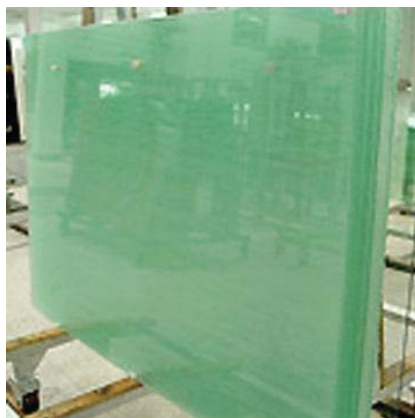


ภาพที่ 1 กระจกซีท

ที่มา : [ประเภทของกระจกพื้นฐาน](http://www.av-glass.com/?p=103) [Online], accessed 20 January 2012. Available from <http://www.av-glass.com/?p=103>

1.7.2 กระจกโฟลทและกระจกขัดผิว เป็นกระจกที่ผลิตด้วยระบบโฟลท คือ การปล่อยให้แก้วไหลลอยอยู่บนผิวของดีบุกหลอมเหลวภายใต้ห้องที่ควบคุมอุณหภูมิและความดันอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ได้กระจกโปร่งใสคุณภาพสูง ผิวสองข้างขนานเรียบสนิท สามารถมองผ่านได้แจ่มชัด ให้ภาพสะท้อนที่สมบูรณ์ไม่บิดเบี้ยว (กวี หวังนิเวศน์กุล 2552 : 153) มีความหนาตั้งแต่ 2 – 19 mm. และมีขนาดใหญ่ถึง 10x3 m. เป็นกระจกที่พัฒนาขึ้นเพื่อสนองต่อความต้องการของผู้ใช้

ที่ซึ่งกระจกสีที่ไม่สามารถที่จะตอบสนองได้ ประโยชน์ใช้สอยของกระจกชนิดนี้มีมาก ตั้งแต่การใช้กับหน้าต่างอาคาร กระจกห้องโชว์ ตู้แสดงสินค้า กระจกเงา จนถึงกระจกนิรภัยที่ใช้กับยานพาหนะ และที่สำคัญก็คือใช้กับการก่อสร้างระดับสูง หรืออาคารขนาดใหญ่



ภาพที่ 2 กระจกโฟลท

ที่มา : David Varani, กระจกโฟลต์ [Online], accessed 20 January 2012. Available from <http://www.idealkote.com/Float-Glass-กระจกโฟลต์.html>

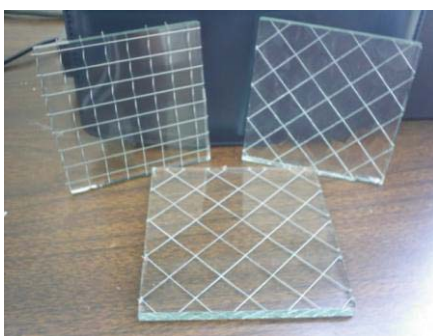
1.7.3 กระจกดอกกลวกลาย เป็นกระจกที่มีการพิมพ์ลวดลายบนผิวของกระจก มีลักษณะกึ่งใสกึ่งฝ้า ช่วยทำให้แสงที่ลอดผ่านนุ่มขึ้น มองผ่านได้น้อยลง และให้ความรู้สึกที่สวยงามแปลกตาไปตามลวดลายของศิลปะที่พิมพ์ไว้ ใช้ได้ดีกับงานตกแต่ง ประโยชน์ใช้สอยมีมากตั้งแต่การใช้กับงานก่อสร้างโดยทั่วไปจนถึงเครื่องเรือน เครื่องใช้ และเครื่องตกแต่ง (พิภพ สุนทรสมัย 2536 : 224)



ภาพที่ 3 กระจกดอกกลวคล้าย

ที่มา : David Varani, กระจกกลวคล้าย [Online], accessed 20 january 2012. Available from <http://www.idealkote.com/Pattern-Glass-กระจกกลวคล้าย.html>

1.7.4 กระจกกลว เป็นกระจกที่มีเส้นลวดหรือแผงตาข่ายลวดฝังอยู่ภายใน มีทั้งชนิดดอกกลวคล้ายและชนิดขัดผิว กระจกชนิดนี้แม้จะแตกเพราะความร้อนจากไฟ เศษกระจกก็จะไม่ร่วงตกลงมาจึงช่วยป้องกันไฟลุกลามได้ นอกจากนี้ยังใช้เพื่อจุดประสงค์ด้านความปลอดภัย เพราะกระจกชนิดนี้ยากแก่การทำลาย เนื่องจากเมื่อแตกหรือถูกกระแทก เศษกระจกจะไม่ตกหล่นหรือกระเจายนั่นเอง (พิภพ สุนทรสมัย 2536 : 224)



ภาพที่ 4 กระจกกลว

ที่มา : Wired Glass about [Online], accessed 20 january 2012. Available from <http://www.ebcu.com/p-wired-glass-1077248.html>

1.7.5 กระจกตัดแสง เป็นกระจกโพลีคาร์บอเนตแต่มีการเติมสารออกไซด์ของโลหะลงไปเพื่อให้เกิดสีขึ้นในเนื้อแก้ว เช่น เหล็กโคบอลต์ หรือซีลีเนียม เป็นต้น ทำให้มีคุณสมบัติในการ

ดูดหรือกั้นพลังงานจากแสงอาทิตย์ที่แผ่รังสีเข้ามาได้ถึงร้อยละ 30 ถึง 50 จึงช่วยให้ภายในห้องหรืออาคารที่ใช้กระจกชนิดนี้ร้อนเย็นกว่าการใช้กระจกใสธรรมดา นอกจากนี้ยังใช้เพื่อช่วยลดความจ้าของแสงสว่างที่ส่องผ่านเข้ามา ทำให้ได้บรรยากาศ ร่มรื่นและเย็นตา (พิภพ สุนทรสมัย 2536 : 224) มักนำไปใช้กับห้องที่มีเครื่องปรับอากาศ และยานพาหนะ โดยทั่วไปสีของกระจกตัดแสงที่เราพบเห็นทั่วไป คือ สีชาหรือสีเทา สีดำ สีฟ้า สีเขียว สีบรอนซ์ และสีทอง เป็นต้น



ภาพที่ 5 กระจกตัดแสง

ที่มา : ประเภทของกระจกพื้นฐาน [Online], accessed 20 January 2012. Available from <http://www.av-glass.com/?p=103>

1.7.6 กระจกสะท้อนแสง ได้แก่ กระจกโพลท ที่มีผิวเคลือบด้วยแผ่นออกไซด์ของโลหะด้วยกรรมวิธี Magnetic Sputtering ทำให้สามารถเคลือบผิวกระจกได้คงทนและบางมากจนซึ่งมีคุณสมบัติด้านการสะท้อนแสงได้ดี (กวี หวังนิเวศน์กุล 2552 : 157) จากคุณสมบัติที่คล้ายกระจกเงาทำให้สามารถสะท้อนพลังงานจากแสงอาทิตย์ที่แผ่รังสีมาได้ถึงร้อยละ 30 ถ้ากระจกที่เคลือบเป็นกระจกตัดแสงด้วย จะยิ่งช่วยทั้งด้านการสะท้อนแสงและดูดพลังงานความร้อนให้ผ่านเข้าไปในห้องหรืออาคารได้มากกว่า 50% อาคารที่ติดตั้งกระจกชนิดนี้หากมองจากภายนอกจะมีลักษณะคล้ายกระจกเงา สะท้อนให้เห็นท้องฟ้า และบริเวณข้างเคียงทำให้อาคารดูสง่าและสวยงาม ในขณะที่ผู้อยู่อาศัยภายในจะมองเห็นกระจกนี้คล้ายกระจกตัดแสง กระจกสะท้อนแสงรู้จักกันทั่วไปในชื่อของกระจกทางเดียว นิยมใช้กับอาคารสูงๆ ในเมืองใหญ่ๆ เนื่องจาก ช่วยลดภาระค่ากระแสไฟของเครื่องปรับอากาศ ทำให้อาคารนั้นดูทันสมัย และช่วยลดแสงสว่างจ้าที่ส่องเข้ามา



ภาพที่ 6 กระจกสะท้อนแสง

ที่มา : S. Kanakaraju Chetty and Son, Reflective glass [Online], accessed 20 January 2012.

Available from <http://www.skcglass.com/products.php>

1.7.7 กระจกนิรภัยหลายชั้น เป็นกระจกที่ผลิตขึ้นเพื่อจุดประสงค์ให้ความปลอดภัยแก่ผู้ใช้ ซึ่งได้จากการนำกระจกตั้งแต่ 2 แผ่นขึ้นไป มาอัดติดกัน โดยมีแผ่นฟิล์ม (polyvinylbutyral หรือ PVB) ที่เหนียวและแข็งแรงซ่อนอยู่ระหว่างกลาง ทำหน้าที่ยึดเกาะให้กระจกทั้งสองแผ่นติดกัน เมื่อกระจกชนิดนี้ถูกกระแทกจนแตก แผ่นฟิล์มจะช่วยยึดเกาะมิให้เศษกระจกหลุดออกมาทำอันตรายแก่ผู้คนและยังคงรูปเป็นแผ่นดั้งเดิม จะมีเพียงรอยแตกหรือรอยร้าวคล้ายใยแมงมุมเท่านั้น และถ้าเลือกใช้แผ่นฟิล์มที่หนา เหนียว และใช้กระจกซ้อนกันหลายแผ่นก็อาจกลายเป็นกระจกนิรภัยที่สามารถป้องกันกระสุนได้ กระจกนิรภัยหลายชั้นเป็นกระจกที่ให้ความปลอดภัยสูง จึงนิยมนำมาใช้เป็นกระจกบังลมหน้ารถยนต์ขนาดใหญ่ เช่น รถโดยสารประจำทาง หน้าต่างอาคารระฟ้า บริเวณเข้าออกของอาคาร หลังคาโดมกระจก ตู้ปลาขนาดใหญ่และราวกันตกที่เป็นแผ่นกระจก เป็นต้น (พิภพ สุนทรสมัย 2536 : 225-226)



ภาพที่ 7 กระจกนิรภัยหลายชั้น

1.7.8 กระจกนิรภัยเทมเปอร์ เป็นกระจกโพลีคาร์บอเนต แต่ผ่านกระบวนการผลิตที่พิเศษ คือ เมื่อน้ำแก้วผ่านเตาเผาจนถึงอุณหภูมิประมาณ 700°C และไหลผ่านมาเป็นแผ่นกระจก ก็จะใช้ลมเป่าทั้งสองด้านของแผ่นกระจกเพื่อให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เนื้อกระจกเกิดแรงกระทำที่สมดุลทั้งผิวนอกและผิวใน มีผลให้กระจกเกิดคุณสมบัติพิเศษขึ้น คือ เมื่อถูกกระแทกหรือทุบ จะแตกละเอียดเป็นเม็ดเล็กๆ คล้ายเม็ดข้าวโพดที่ไม่มีคมจึงไม่เป็นอันตรายต่อการถูกบาดจากคมเศษกระจก นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงกว่ากระจกธรรมดาถึง 3 - 5 เท่า (กวี หวังนิเวศน์กุล 2552 : 158-159) นิยมใช้กับยานพาหนะ ประตูทางเข้า หรือส่วนของอาคารที่ง่ายต่อการถูกกระแทกกระแทกอยู่เสมอ กระจกนิรภัยเทมเปอร์ หากนำมาใช้เป็นกระจบบังลมหน้าของรถยนต์ จะมีลักษณะแตกต่างกันออกไปอีก คือ เมื่อร้าวหรือแตกบริเวณส่วนกลางของแผ่นกระจกจะต้องแตกเป็นชิ้นใหญ่ๆ ซึ่งจะช่วยให้ผู้ขับขี่ด้วยความเร็วสูงสามารถมองเห็นถนนได้ กระจกชนิดนี้เรียกว่า กระจกนิรภัยโซนเทมเปอร์



ภาพที่ 8 กระจกนิรภัยเทมเปอร์

ที่มา : [Toughened / Tempered Glass \(DF-02\)](http://dongfa-glass.en.made-in-china.com/product/PMYQKmqJqfho/China-Toughened-Tempered-Glass-DF-02-.html) [Online], accessed 20 january 2012. Available from <http://dongfa-glass.en.made-in-china.com/product/PMYQKmqJqfho/China-Toughened-Tempered-Glass-DF-02-.html> l

1.7.9 กระจกฉนวน มีลักษณะเป็นกระจกสองแผ่นวางคู่ขนานกัน เว้นระยะห่างพอสมควร ที่ขอบกระจกทุกด้านโดยรอบเชื่อมไว้ด้วยสารจำพวกกาวที่มีสารดูดความชื้นบรรจุอยู่ เพื่อให้ช่องว่างระหว่างแผ่นทั้งสองแห่งนี้ ส่วนกาวที่เคลือบรอบแผ่นกระจกจะช่วยให้กระจกทั้งคู่คงรูป และป้องกันไม่ให้ความชื้นจากภายนอกรั่วซึมเข้าไปในช่องว่างนี้ กระจกฉนวนนี้มีประสิทธิภาพเป็นสองเท่า เมื่อเทียบกับกระจกธรรมดาแผ่นเดียว เป็นกระจกที่ช่วยในด้านการประหยัดพลังงาน ป้องกันการถ่ายเทความร้อนระหว่างภายในกับภายนอกอาคาร เมื่ออุณหภูมิภายในกับภายนอกอาคารแตกต่างกันอย่างมากก็ช่วยให้ไม่เกิดฝ้าหรือหยดน้ำ นอกจากนี้ยังสามารถตัดเสียงรบกวนจากภายนอกหรือภายในได้ด้วย (พิภพ สุทรสมัย 2536 : 226) นิยมใช้มากกับอาคารปรับอากาศบ้านเรือนในประเทศหนาว อาคารสนามบิน ห้องซ้อมดนตรี ห้องบันทึกเสียง หน้าต่างรถไฟและตู้แช่ที่ต้องการ โขว์ลีนค่า เป็นต้น



ภาพที่ 9 กระจกฉนวน

ที่มา : [Sealed Insulating Glass](http://www.made-in-china.com/showroom/blueskyglass/product-detailQbHnuwUoYepi/China-Sealed-Insulating-Glass.html) [Online], accessed 20 January 2012. Available from <http://www.made-in-china.com/showroom/blueskyglass/product-detailQbHnuwUoYepi/China-Sealed-Insulating-Glass.html>

1.7.10 กระจกเงา เป็นกระจกอีกชนิดหนึ่งที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย กระจกเงาได้จากการนำกระจกใสหรือกระจกสี มาฉาบผิวด้านหนึ่งด้วยโลหะเงินแล้วเคลือบด้วยสีหรือเซลล์อีกชั้นหนึ่ง ปัจจุบันหากเป็นกระจกเงาอย่างดีภายหลังจากการฉาบผิวด้วยโลหะเงินแล้ว จะมาเคลือบด้วยโลหะทองแดงครั้งหนึ่งก่อนการนำไปทาสีหรือเซลล์กันความชื้น จะทำให้อายุการใช้งานยืนยาวมากยิ่งขึ้น กระจกเงานอกจากจะใช้ในการส่องดูรูปร่างหน้าตาตนเองแล้ว ยังใช้ในการตกแต่งอาคารได้หลายประการ เช่น ใช้กรุผนังแทนการทาสี ใช้เพื่อเพิ่มพื้นที่ห้องที่แคบให้กว้างขึ้นด้วยความรู้สึก ใช้ตกแต่งพื้นที่ให้แลดูทันสมัย เป็นต้น (พิภพ สุนทรสมัย 2536 : 226-227)



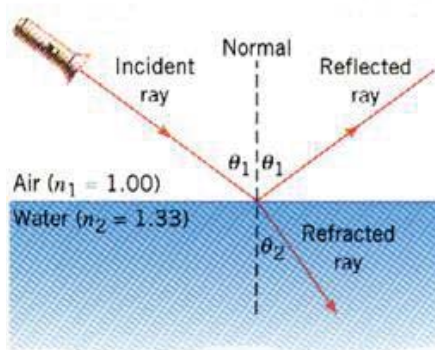
ภาพที่ 10 กระจกเงา

2. การหักเหของแสง

เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางโปร่งแสงจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 11 จะปรากฏมีแสงบางส่วนสะท้อนกลับและบางส่วนเคลื่อนที่หักเหเข้าไปในตัวกลางที่ 2 ทั้งรังสีตกกระทบ รังสีสะท้อน และรังสีหักเหอยู่ในระนาบเดียวกัน ถ้าความเร็วของแสงในตัวกลางใหม่ต่างจากตัวกลางเดิม จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การหักเห (refraction) ความเร็วของแสงในตัวกลางที่โปร่งกว่าเช่น อากาศ จะมีความเร็วสูงกว่าในน้ำซึ่งเป็นตัวกลางที่ทึบกว่า (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะวิทยาศาสตร์ 2541 : 278)

2.1 กฎการหักเห

เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่ทึบกว่า ทิศทางจะเบนเข้าหาเส้นปกติดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แสดงรังสีตกกระทบ รังสีหักเห และรังสีสะท้อนของแสง เมื่อแสงเดินทางจากอากาศไปยังน้ำ

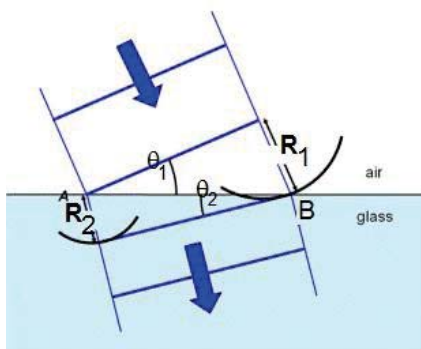
ที่มา : ปรียา อนุพงษ์อ้อ, การหักเหของแสง [Online], accessed 18 January 2012. Available from http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh_6.htm

ถ้า θ_1 เป็นมุมที่แสงตกทำกับเส้นปกติ และ θ_2 เป็นมุมหักเห การเดินทางของแสงจะเป็นไปตามกฎของสเนล (Snell's law) คือ

$$\frac{1}{c_1} \sin \theta_1 = \frac{1}{c_2} \sin \theta_2$$

เมื่อ c_1 คือ ความเร็วแสงในตัวกลาง 1 และ c_2 คือ ความเร็วแสงในตัวกลางที่ 2

เหตุที่เกิดการเปลี่ยนทิศของแสง เพราะคลื่นแสงที่เดินทางในตัวกลางที่ 2 มีหน้าคลื่นเปลี่ยนไปดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การหักเหของหน้าคลื่นแสงที่ไม่ตั้งฉากกับขอบเขตแบ่งตัวกลาง

เมื่อคลื่นแสงเดินทางในตัวกลางที่ 1 และ 2 ในเวลาเดียวกันเท่ากับ Δt ระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ในตัวกลางที่ 1 คือ $R_1 = c_1 \Delta t$

และระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ในตัวกลางที่ 2 คือ $R_2 = c_2 \Delta t$

จากภาพที่ 12 จะได้

$$\sin \theta_1 = \frac{R_1}{AB} = \frac{c_1 \Delta t}{AB}$$

$$\sin \theta_2 = \frac{R_2}{AB} = \frac{c_2 \Delta t}{AB}$$

เมื่อคลื่นแสงที่เดินทางในตัวกลางทั้งสองในเวลาเดียวกัน จะได้

$$\frac{\sin \theta_1}{c_1} = \frac{\sin \theta_2}{c_2}$$

ความสัมพันธ์นี้คือ กฎของสเนล โดยที่ค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง คือ

$$n = \frac{c}{c_1}$$

เมื่อ c = ความเร็วของแสงในสุญญากาศ

c_1 = ความเร็วของแสงในตัวกลางใด ๆ

ดังนั้นจะได้กฎของสเนล คือ $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะวิทยาศาสตร์ 2541 : 279-280)

2.2 การสะท้อนกลับหมด

เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่ทึบกว่า แสงจะเบนเข้าหาเส้นปกติ เมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่โปร่งกว่าจะเบนออกจากเส้นปกติ ฉะนั้นเมื่อแสงตกทำมุมโตที่เรียกว่า มุมวิกฤต (critical angle) แสงที่ผ่านไปยังตัวกลางที่โปร่งกว่าจะทำมุม 90° หรือหักขนานไปกับผิว และเมื่อแสงตกกระทบทำมุมโตยิ่งขึ้น ก็จะไม่มีการเดินทางผ่านไปยังตัวกลางที่โปร่งกว่าคือ จะเกิดการสะท้อนกลับหมดภายในตัวกลางนั้น

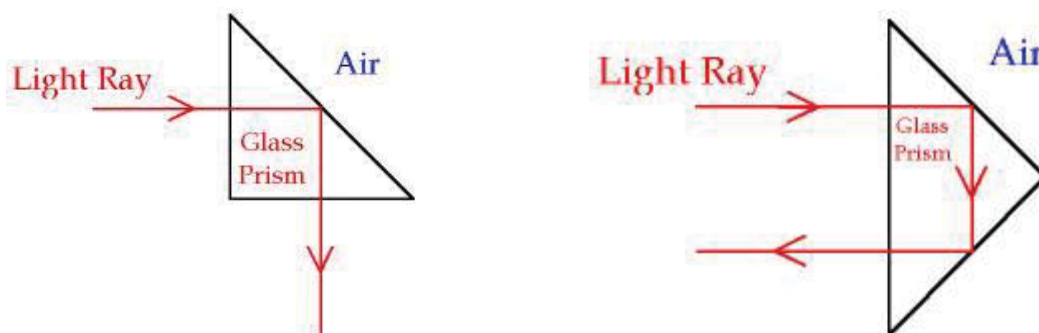
พิจารณามุมวิกฤตของแสงตกกระทบในแก้ว ($n = 1.5$) ออกสู่อากาศให้ $\theta_2 = 90^\circ$ เมื่อใช้กฎของสเนลจะหาค่ามุมวิกฤตของแสงที่ตกกระทบในแก้วได้

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ \quad (n_1 = 1.5, n_2 = 1)$$

$$\sin \theta_c = 0.67$$

$$\theta_c = 42^\circ$$

จะเห็นได้ว่ามุมวิกฤตของแก้วในอากาศจะน้อยกว่า 45° (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะวิทยาศาสตร์ 2541 : 280-281) ถ้าแสงตกกระทบปริซึมแก้วในลักษณะดังภาพที่ 13 จะเกิดการสะท้อนกลับหมดของแสง



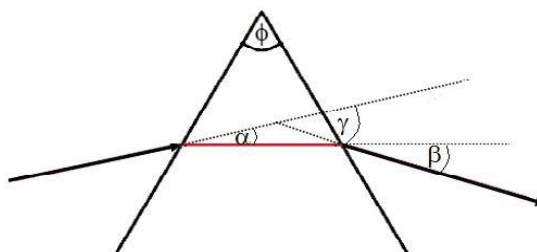
ภาพที่ 13 การสะท้อนกลับหมดของแสงเมื่อผ่านปริซึมแก้ว

ที่มา : Eric Ablett et al, Applications of Total Internal Reflection [Online], accessed 18 January 2012. Available from <http://2011sec2lss.wikispaces.com/Applications+of+ Total+Internal+ Reflection>

2.3 การหักเหที่แท่งแก้วและปริซึม

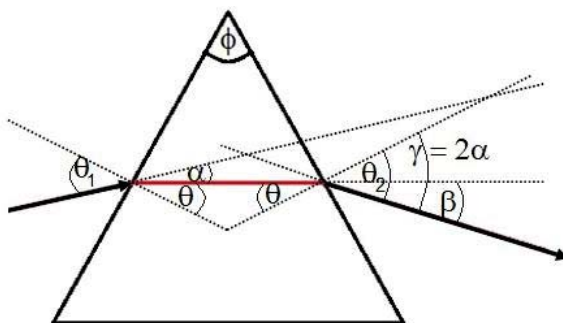
เมื่อแสงตกกระทบแท่งแก้ว จะเห็นว่าแสงหักเหเข้าหาเส้นปกติ และเมื่อแสงหักเหผ่านจากแท่งแก้วสู่อากาศอีกครั้ง ทิศทางของแสงจะขนานกับแสงตกกระทบเดิม แต่เมื่อแสงตกกระทบสามเหลี่ยม แสงที่หักเหผ่านปริซึมออกสู่อากาศ จะทำมุมกับแนวแสงตกกระทบเดิม เรียกว่าเกิดการบ่ายเบน (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะวิทยาศาสตร์ 2541 : 282)

พิจารณาปริซึมดังภาพที่ 14 แสงหักเหผ่านปริซึมด้วยมุม α และบ่ายเบนจากแนวเดิมเมื่อออกไปสู่อากาศด้วยมุม β ค่ามุมเบี่ยงเบนทั้งหมดเป็นมุม γ ซึ่งเท่ากับมุม $(\alpha + \beta)$ โดยมุมนี้ขึ้นกับค่าดัชนีหักเหของปริซึมและมุมตกกระทบของแสงเดิม



ภาพที่ 14 เมื่อแสงผ่านปริซึมจะบ่ายเบนเป็นมุม γ

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างมุม γ และค่าดัชนีหักเหของปริซึมได้โดยง่ายในกรณีที่มุม α เท่ากับมุม β ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 15 แสงที่ผ่านปริซึมเมื่อมุม $\alpha = \beta$

จากภาพข้างต้น จะได้

$$\theta = \phi/2$$

$$\theta_1 = \theta + \alpha$$

$$\theta_1 = (\phi/2) + (\gamma/2)$$

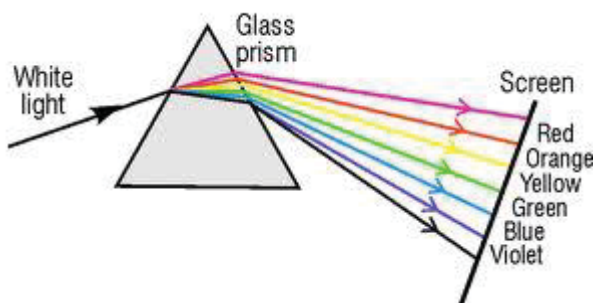
จากกฎของสเนล

$$\sin \theta_1 = n \sin \theta_2$$

หรือ

$$\sin \frac{(\phi + \gamma)}{2} = n \sin \frac{\phi}{2}$$

ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างมุมเบี่ยงเบน γ มุมยอด ϕ และดัชนีหักเห แต่โดยทั่วไปค่าของดัชนีหักเหจะขึ้นอยู่กับค่าความยาวช่วงคลื่นของแสง (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะวิทยาศาสตร์ 2541 : 282) ที่ช่วงคลื่นยาวจะมีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่าช่วงคลื่นสั้น ฉะนั้นแสงสีม่วงเมื่อหักเหผ่านปริซึมจึงมีมุมเบี่ยงเบนมากกว่าแสงสีแดงดังภาพที่ 16 ซึ่งนิวตันค้นพบว่าแสงอาทิตย์ประกอบด้วยสีทั้งเจ็ดโดยใช้ปริซึม



ภาพที่ 16 ปริซึมกระจายแสงขาวออกเป็นสีต่างๆ

ที่มา : Leno S. Pedrotti, Basic Geometrical Optics [Online], accessed 18 January 2012. Available from http://cord.org/step_online/st1-3/st13ei4.htm

3. หลักการของ Becke line

3.1 ประวัติของ Becke

Friedrich Johann Karl Becke เกิดเมื่อวันที่ 31 ธันวาคม ค.ศ. 1855 ณ กรุงปราก ประเทศเชคโกสโลวาเกีย จากนั้น Becke ย้ายไปอยู่ที่เวียนนา ประเทศออสเตรีย ซึ่งเขาได้ศึกษากับ Gustav Tschermak และได้รับการแต่งตั้งเป็นประธานของการศึกษาเกี่ยวแร่ที่มหาวิทยาลัยเวียนนา ในปี ค.ศ. 1898 อีกหลายปีต่อมาก็ได้เป็นอธิการบดีในปี ค.ศ. 1921 หลังจากนั้น 10 ปี เขาก็เสียชีวิตในช่วงฤดูร้อนในปี ค.ศ. 1931 Becke นำเสนอผลงาน ในปี ค.ศ. 1903 เกี่ยวกับองค์ประกอบและรายละเอียดของผลึกหินชีสต์ (schists) ในงานประชุมทางธรณีวิทยานานาชาติ ซึ่งเป็นการบรรยายทฤษฎีของหินแปรที่ครอบคลุมเนื้อหาว้างขวางเป็นครั้งแรก ผลงานที่ตามมาของเขาก็คือการเชื่อมต่อของหินแปรซึ่งนำไปสู่ ความเข้าใจอย่างละเอียดมากขึ้นของแนวภูเขาโบราณทั้งหลาย หลังจากปี ค.ศ. 1899 เขาช่วยทำหน้าที่เป็นบรรณาธิการของวารสาร Mineralogische und Petrographische Mitteilungen (Mineralogical and Petrographical Notices)



Friedrich Becke
(1855-1931)

ภาพที่ 17 Friedrich Johann Karl Becke

ที่มา : Michael W. Davidson, Friedrich Johann Karl Becke [Online], accessed 20 January 2012.

Available from <http://micro.magnet.fsu.edu/optics/timeline/people/becke.html>

สมาคมแร่แห่งออสเตรีย (Austrian Mineralogical Society ก่อตั้งขึ้นในปี ค.ศ. 1901) ได้มอบเหรียญรางวัลให้แก่ Becke เพื่อเป็นการสรรเสริญความมีชื่อเสียงในด้านผู้เชี่ยวชาญวิชาแร่และเป็นประธานคนที่สอง ทั้งยังเป็นนักวิทยาศาสตร์ที่โดดเด่นมีผลงานที่ได้ตีพิมพ์ ซึ่งมีความสำคัญกับสาขาวิชาต่างๆ เช่น แร่วิทยา, ศาสตร์ว่าด้วยรูปแบบผลึก, วิชาที่ว่าด้วยลักษณะและการกำเนิดของหิน และสาขาวิชาอื่นๆ ในภูมิศาสตร์กายภาพและธรณีเคมี Becke เป็นสมาชิกของสถาบันวิทยาศาสตร์และมนุษยศาสตร์ แห่งเบอร์ลิน-บรานเดนเบิร์ก (Berlin - Brandenburg Academy of Sciences and Humanities) และเป็นสมาชิกกิตติมศักดิ์ของสมาคมธรณีวิทยาแห่งสวีเดนในปี ค.ศ. 1916 (Geological Society of Sweden)

Friedrich Becke เป็นนักธรณีวิทยาชาวออสเตรียที่มีความเชี่ยวชาญเรื่องแร่ การกำเนิดและลักษณะของหินจากมหาวิทยาลัยปราก โดยเป็นผู้ที่พัฒนาวิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างการหักเหของแสงและความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหที่พบในตัวอย่าง จากการสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์ ปรากฏการณ์นี้เป็นรูปแบบปรากฏการณ์ของ Becke lines ซึ่งถูกตั้งตามชื่อของเขา

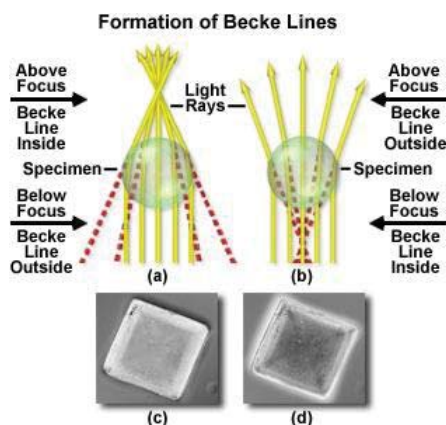
ผลงานของ Becke มีความสำคัญต่อการศึกษาการเกิดผลึกใหม่ของหินแปรโดยต่อมาได้พัฒนาเป็นคำศัพท์เฉพาะ และช่วยจำแนกประเภทของกลุ่มแร่ในหินแปร

การทำ Becke line เป็นการทดสอบที่ใช้เปรียบเทียบเพื่อกำหนดค่าดัชนีหักเหโดยประมาณของแร่ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน โดยการใช้แสงระนาบโพลาไรซ์ ในส่วนของไอริสไดอะแฟรมใช้ปรับเพื่อเน้นขอบเขตของเม็ดแร่ ผลที่ได้ Becke line จะปรากฏในลักษณะของเส้นแสงบางๆ ซึ่งถ้าไม่อยู่รอบๆตัวอย่างก็จะมองเห็นได้ภายในบริเวณขอบของตัวอย่าง ถ้าเลื่อนเลนส์ใกล้วัตถุของกล้องจุลทรรศน์ขึ้นหรือลงจากตำแหน่งโฟกัสแล้ว Becke line จะเคลื่อนไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหสูงกว่า โดยทั่วไปตัวกลางที่เหมาะสมสำหรับการกำหนดค่าดัชนีหักเหของแสง (การสังเกตเส้น Becke line) คือตัวกลางที่รู้ว่ามีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับแร่ โดยการจุ่มในน้ำมันหรือการวางไว้ในตัวกลางเช่น ยางสน เป็นต้น

3.2 นิยามของ Becke line

เส้น Becke lines มีการให้นิยามว่าเป็นเส้นแถบมืดหรือสว่าง (เนื่องจากการหักเหหรือการเลี้ยวเบนของแสง) ทำให้เกิดภาพที่ขอบระหว่างตัวกลางที่มีความยาวของทางเดินของแสงแตกต่างกัน Becke lines จะเคลื่อนย้ายไปในทิศทางที่มีความยาวของทางเดินของแสงมากกว่า เมื่อระยะห่างระหว่างเลนส์ใกล้วัตถุและวัตถุเพิ่มขึ้น เส้น Becke line จะหายไปในพื้นที่ของวัตถุที่อยู่ในตำแหน่งโฟกัสที่ถูกต้อง (Davidson 2012)

การเกิดของเส้น Becke lines แสดงในภาพที่ 18 โดยภาพ (a) เป็นตัวอย่างโปร่งใสมีดัชนีหักเหสูงกว่าตัวกลางที่อยู่โดยรอบ เมื่อปรับเลนส์ใกล้วัตถุอยู่เหนือตำแหน่งโฟกัส เส้นสว่าง Becke line จะปรากฏอยู่ภายในตัวอย่าง แต่เส้น Becke line จะปรากฏขยายและล้อมรอบตัวอย่าง เมื่อเลนส์ใกล้วัตถุเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านล่างจุดโฟกัส ถ้าตัวอย่างมีดัชนีหักเหต่ำกว่าตัวกลางดังกล่าว (b) สถานการณ์จะกลับกันหากทำให้เลนส์ใกล้วัตถุอยู่เหนือจุดโฟกัส จะเกิดเส้นสว่าง Becke line รอบตัวอย่าง



ภาพที่ 18 รูปแบบการเกิดเส้น Becke line

ที่มา : Michael W. Davidson, Friedrich Johann Karl Becke [Online], accessed 20 january 2012.

Available from <http://micro.magnet.fsu.edu/optics/timeline/people/becke.html>

เม็ดแร่และเส้นใยมักจะมีพื้นผิวขนออกมาและทำให้แสงแยกออกหรือบรรจบกันอย่างไรอย่างหนึ่ง ขึ้นอยู่กับค่าดัชนีหักเหต่ำกว่าหรือสูงกว่าตัวกลาง (โดยปกติจะเป็นน้ำมัน) โดยรอบ ในทั้งสองกรณีแสงจะบรรจบกันในตัวกลางที่มีดัชนีหักเหสูงกว่า ตัวอย่างที่มีพื้นผิวเรียบขนานจะทำให้เกิดเส้น Becke lines บริเวณขอบที่มีดัชนีหักเหสูงกว่าโดยจะเกิดการสะท้อนภายในทั้งหมด

เส้น Becke lines ที่น่าเชื่อถืออาจได้จากการปรับกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุให้มีกำลังปานกลาง (10x ถึง 50x) กับปรับตัวเลข numerical aperture อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.7 ในส่วนของ condenser aperture ควรจะปรับลดลงจนกระทั่งเห็นเส้น Becke line คมชัดที่สุดผ่านทางเลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทรรศน์ แล้วปรับขนาด aperture เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพื่อให้เห็นความแตกต่างของดัชนีหักเหระหว่างตัวอย่างและตัวกลางเล็กน้อย การปรับ condenser aperture ควรปรับในขณะที่ดูตัวอย่างและปรับไดอะแฟรมตามลำดับ จนเห็นเส้น Becke line คีที่สุด

4. วัสดุพลาสติก

โพลิเมอร์ (polymer) คือ โมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่ประกอบไปด้วยหน่วยที่ซ้ำๆกัน (repeating unit) ที่เรียกว่า เมอร์ หรือ โมโนเมอร์ (monomer) จำนวนมาก ดังนั้น ชื่อ

ของโพลิเมอร์ต่างๆ จึงมักจะมีคำนำหน้าว่า โพลิ- และตามด้วยชื่อของโมโนเมอร์ที่ประกอบอยู่ในโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น โพลิเอทิลีน หมายถึง โพลิเมอร์ที่มีโมโนเมอร์ของกลุ่มเอทิลีน เป็นต้น โดยทั่วไปคำว่าโพลิเมอร์และพลาสติกมักจะมีการใช้งานแทนกันโดยหมายถึงสิ่งเดียวกัน แต่ความจริงแล้วทั้งสองคำนี้มีความแตกต่างกันอยู่พอสมควร คำว่าโพลิเมอร์นั้นหมายถึง วัสดุบริสุทธิ์ เริ่มต้นที่ได้จากกระบวนการทางปฏิกิริยาเคมีในการเกิดโพลิเมอร์ (polymerization) ส่วนคำว่าพลาสติกนั้นจะหมายถึง โพลิเมอร์ที่มีการผสมสารเติมแต่งต่างๆ ลงไปผสมเข้าด้วยกันเพื่อให้โพลิเมอร์บริสุทธิ์นั้นมีสมบัติที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตหรือการใช้งานเพิ่มมากขึ้น (จินตมัย สุวรรณประทีป 2547 : 4) เช่น สารหน่วงการติดไฟ (flame retardant) ผงสี (pigment) สารป้องกันแสงยูวี (anti UV agent) เป็นต้น

พลาสติกเป็นสารประกอบของธาตุไฮโดรคาร์บอนซึ่งเกิดจากน้ำมันปิโตรเลียมและก๊าซธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมีธาตุประกอบอื่นอีก เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน ฟลูออรีน คลอรีน ฟอสฟอรัส กำมะถัน ฯลฯ

แหล่งกำเนิดของพลาสติกมาจาก 5 แหล่งใหญ่ๆ (กวี หวังนิเวศน์กุล 2552 : 260-261) ดังนี้

1. ผลิตผลจากน้ำมันและถ่านหิน (petroleum และ coal) เช่น อีพ็อกซี ไนลอน อะคริลิก โพลีเอสเตอร์ โพลิเอทิลีน ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นต้น
2. ผลิตผลจากน้ำมันและสินแร่ (petroleum และ mineral) เช่น ซิลิโคน โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ โพลีไวนิลคลอไรด์ โพลีไวนิลบิวไทรอล เป็นต้น
3. ผลิตผลจากการเกษตร (agriculture) เช่น เซลลูโลสไนเตรต เซลลูโลสอะซีเตต เซลลูลิก เอทิลเซลลูโลส บิวไทเรต เป็นต้น
4. ผลิตผลจากการเกษตรและน้ำมัน (agriculture และ petroleum) เช่น ฟูเรน เป็นต้น
5. ผลิตผลจากสินแร่ (mineral) เช่น แคลเซียม-อะลูมิเนียมซิลิเกต เป็นต้น

พลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ พลาสติกอ่อนหรือเทอร์โมพลาสติก และพลาสติกแข็งหรือเทอร์โมเซตติง

4.1 พลาสติกอ่อน (Thermoplastics)

พลาสติกอ่อนหรือเทอร์โมพลาสติก คือ พลาสติกที่ประกอบด้วยสายโซ่โมเลกุลขนาดยาวที่ถูกยึดกันอยู่ด้วยพันธะแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งไม่แข็งแรงมากนัก หากจะเปรียบเทียบก็จะคล้ายคลึงกับเส้นขนมหินที่พันทับกันไปมา เมื่อสายโซ่โมเลกุลเหล่านี้ได้รับความร้อน พันธะที่ยึดแต่ละสายโซ่เข้าด้วยกันจะมีความอ่อนแอลงและสายโซ่ก็จะเคลื่อนที่ได้มากขึ้น ทำให้พลาสติกประเภทนี้มีลักษณะที่อ่อนนิ่มลงและหลอมเหลวในที่สุด เมื่ออุณหภูมิสูงเพียงพอ แต่ภายหลังจากปล่อยให้เย็นลง พลาสติกหลอมเหลวดังกล่าวสามารถที่จะแข็งตัวได้อีกครั้ง เปรียบเทียบได้กับการหลอมของเทียนไขเมื่อได้รับความร้อนและแข็งตัวเป็นก้อนได้อีก เรียก plastics with a memory ความสามารถในการหลอมเหลวและแข็งตัวได้ใหม่หลายครั้งนี้ถือได้ว่าเป็นข้อดีของเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากสามารถทำให้เป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่าย แต่ในขณะเดียวกันก็เป็นข้อเสีย คือ พลาสติกประเภทนี้มักจะไม่นทนทานต่ออุณหภูมิสูง นอกจากนี้ในแต่ละรอบของการหลอมเหลวนั้น พลาสติกที่แข็งตัวกลับมาใหม่จะมีสมบัติที่ด้อยลงกว่าเดิมอีกด้วย (จินตมัย สุวรรณประทีป 2547 : 5)

4.1.1 โพลีเอทิลีน (polyethylene)

พลาสติกนี้ อักษรย่อ PE เมื่อสัมผัสผิวจะรู้สึกเหมือนไขเป็นมันจึงมีคุณสมบัติลื่น จะทนต่อน้ำยาล้างผงซักฟอก น้ำมัน จาระบี กรด และด่าง สามารถละลายในสารละลายบางชนิดได้ เช่น ไตรคลอโรเอทิลีน (trichlorethylene) มีลักษณะไม่มีสี แสงผ่านได้ หรือมีสีขาวหรือสีเหมือนนม ข้อมสีได้ พลาสติกนี้สามารถทำการเป่า ปาดผิว เชื่อมประสานและติดกาวได้ (มานพ ดันตระบัณฑิตย์ 2548 : 292)

4.1.1.1 โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene)

โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำหรือโพลีเอทิลีนอ่อน อักษรย่อ LDPE มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง $0.918 - 0.935 \text{ g/cm}^3$ จะใช้กรรมวิธีการผลิตที่มีความดันสูงมาก มีความอ่อน หยุนตัว (flexible) และรักษารูปทรงได้ถึง $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ มีความต้านแรงดึงประมาณ 10 N/mm^2 (จินตมัย สุวรรณประทีป 2547 : 5) ประโยชน์ ใช้ทำพลาสติกแผ่นบาง แผ่นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ ขวดใส่สารเคมี ขวดสำหรับบีบได้ ท่อชนิดหยุนตัว พลาสติกเป็นแผ่นแถบ และฉนวนหุ้มสายไฟ เป็นต้น



ภาพที่ 19 ที่หุ้มรองเท้าป้องกันฝุ่นและสิ่งสกปรกทำจากโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ที่มา : [Shoes Cover](http://www.advance-pack.co.th/contents.php?cat=9) [Online], accessed 21 january 2012. Available from <http://www.advance-pack.co.th/contents.php?cat=9>

4.1.1.2 โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแบบโครงสร้างเส้นตรง (linear low density polyethylene)

อักษรย่อ LLDPE มีลักษณะเช่นเดียวกับโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แต่มีโครงสร้างที่เป็นระเบียบมากกว่าและมีสายโซ่ข้างเคียงที่สั้นกว่า ทำให้มีความแกร่งมากกว่า แข็งแรงมากกว่า และเหนียวมากกว่า ใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับ LDPE (จินตมัย สุวรรณประทีป 2547 : 5)



ภาพที่ 20 แผ่นฟิล์มบางทำมาจาก โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแบบโครงสร้างเส้นตรง

ที่มา : [About DAco-Trade Ltd](http://daco-trade.com/) [Online], accessed 21 january 2012. Available from <http://daco-trade.com/>

4.1.1.3 โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene)

โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงหรือโพลีเอทิลีนแข็ง อักษรย่อ HDPE มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง $0.935 - 0.965 \text{ g/cm}^3$ เป็นพลาสติกที่มีปริมาณความเป็นผลึกมากกว่า LDPE และ LLDPE ใช้กรรมวิธีการผลิตที่มีความดันต่ำมีความแข็ง หยุนตัว ไม่แตกหักและรักษารูปร่างได้ระหว่าง $-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ มีความต้านแรงดึงประมาณ 25 N/mm^2 (จินตมัย สุวรรณประทีป 2547 : 5) ประโยชน์ ใช้ทำลีน ภาชนะ ท่อ ถัง ฟิล์ม ฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า และบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เป็นต้น



ภาพที่ 21 ขวดพลาสติกชนิดต่างๆที่เป็น โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง

ที่มา : ครูผู้ช่วย [นามแฝง], [HDPE High Density Polyethylene](http://www.foodnetworksolution.com/vocab/wordcap/HDPE) [Online], accessed 21 january 2012. Available from <http://www.foodnetworksolution.com/vocab/wordcap/HDPE>

4.1.2 โพลีโพรไพลีน (polypropylene)

โพลีโพรไพลีน อักษรย่อ PP เป็นพลาสติกที่มีความหนาแน่นต่ำมาก คือ 0.89 g/cm^3 มีจำหน่ายทั้งที่เป็นโฮโมโพลิเมอร์และโคโพลิเมอร์ มีคุณสมบัติ แกร่ง แข็งแรง ทนทานต่อความล้า และสารเคมีได้ดี รักษารูปทรงได้ถึง $130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จนสามารถนำไปใช้ดัดในน้ำเดือดเป็นเวลานานๆได้ แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ โพลีโพรไพลีน จะเปราะจึงห้ามนำมาทำชิ้นส่วนในระบบทำความเย็น (مانف ต้นตระกูลบัณฑิตย์ 2548 : 292) ประโยชน์ ใช้ในการผลิตเป็นชิ้นส่วนในเครื่องซักผ้า ชิ้นส่วนรถยนต์ มือจับ ชิ้นส่วนเครื่องมือ กล้องแบตเตอรี่ กระเป๋า ถังน้ำ ส่วนของบานพับ เชือก ตัวเรือนของใช้ในครัวเรือน เป็นต้น



ภาพที่ 22 พลาสติกส่วนภายนอกและภายในของรถทำจากโพลีโพรไพลีน ซึ่งออกแบบมาเพื่อให้อึด มีน้ำหนักเบาและประหยัดพลังงาน

ที่มา : Khadem Al. Qubaisi and Gerhard Roiss, Easing the burden for both small and luxury car manufacturers [Online], accessed 21 January 2012. Available from <http://www.borealisgroup.com/industry-solutions/mobility/automotive-weight-debate/>

4.1.3 โพลีเอไมด์ (polyamide)

โพลีเอไมด์มีชื่อทั่วไปว่าไนลอน อักษรย่อ PA มีความหนาแน่น $1.02 - 1.21 \text{ g/cm}^3$ มีคุณสมบัติ คือ มีสีขาวเหมือนนม ย้อมสีได้แข็งและเหนียว มีความต้านแรงดึงสูง ทนต่อการเสียดทาน ทนต่อกรดอ่อน ต่าง สารละลายเกลือเบนซีน น้ำมันและสารละลายส่วนใหญ่ได้ มีความลื่นดี สามารถคลื่นและการสันสะเทือนได้ มีความต้านแรงดึงประมาณ 70 N/mm^2 รักษารูปทรงได้ถึง

100 °C ทนความร้อนแบบชั่วคราวได้ถึง 190 °C อุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูปจะต้องมากกว่า 220 °C พลาสติกนี้สามารถนำมาทำการฉีดในแม่พิมพ์ (injection moulding) หล่อแบบต่อเนื่อง (continuous die casting) ตัดทวน เชื่อมประสานและปาดผิวได้ (मानप दंतदरबद्धतित्य 2548 : 297) ประโยชน์ ใช้ผลิตเฟือง รอกเพลา บูรอรอกเพลา ชุดลูกปืน รางเลื่อน ลูกกลิ้งนำร่อง พู่เลย์ โซ่ลำเลียง สายลากดึง ถังน้ำมัน ฝาครอบเครื่องมือ เชือกไนลอน ขนแปรงสีฟัน อวน แห เอ็นตาข่าย เส้นใย เป็นต้น



ภาพที่ 23 ล้อรกลำเลียงที่เป็น โพลีเอไมด์

ที่มา : [Overhead Conveyor Trolleys and Shackles](http://www.mimezamco.com/products/poultry/overhead_conveyor_trolleys_shackles.htm) [Online], accessed 21 january 2012. Available from http://www.mimezamco.com/products/poultry/overhead_conveyor_trolleys_shackles.htm

4.1.4 โพลีออกซิเมทีลีน (polyoxymethylene หรือ polyacetal)

โพลีออกซิเมทีลีน มีชื่อทั่วไปว่า โพลีเอซีทัล อักษรย่อ POM มีความหนาแน่น 1.41 – 1.42 g/cm³ มีความเหนียวแน่นมาก รักษารูปทรงได้ในขณะอุณหภูมิร้อน มีค่าความต้านแรงดึง ประมาณ 70 N/mm² ใช้งานได้ถึงอุณหภูมิ 140 °C พลาสติกนี้สามารถทำการผลิตด้วยการฉีดในแม่พิมพ์ ปาดผิวและเชื่อมประสานได้ (मानप दंतदरबद्धतित्य 2548 : 299) ประโยชน์ ใช้ผลิตแผ่น ลูกเบี้ยว ชิ้นส่วนเครื่องล้างขามและเรือนปั้มน้ำมัน เป็นต้น โดยทั่วไปสามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทเดียวกับไนลอน แต่จะดูดซับความชื้นน้อยกว่า



ภาพที่ 24 เฟืองต่างๆที่ผลิตจากโพลีเอซีทล

ที่มา : [Overhead Conveyor Trolleys and Shackles](http://www.mimezamco.com/products/poultry/overhead_conveyor_trolleys_shackles.htm) [Online], accessed 21 January 2012. Available from http://www.mimezamco.com/products/poultry/overhead_conveyor_trolleys_shackles.htm

4.1.5 โพลีเตตราฟลูออโรเอทีลีน (polytetrafluoroethylene)

โพลีเตตราฟลูออโรเอทีลีน อักษรย่อ PTFE มีชื่อทางการค้าว่า เทฟลอน (teflon) มีความหนาแน่น $2.0 - 2.3 \text{ g/cm}^3$ มีสีขาวเหมือนนม สัมผัสผิวจะมัน อ่อน หยุนตัวและเหนียว ทนต่อบรรยากาศได้ดี ทนต่อสารเคมีและสารละลายที่อุณหภูมิสูงจะไม่ถูกกัดกร่อน ช่วงอุณหภูมิใช้งานอยู่ระหว่าง $-150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $280 \text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยมีคุณสมบัติทางกลเหมือนเดิม ทนต่อการสึกหรอ มีความต้านแรงดึงประมาณ 30 N/mm^2 มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำมาก ไม่สามารถขึ้นรูปด้วยความร้อนได้ จึงขึ้นรูปด้วยการขึ้นเตอริงที่อุณหภูมิ $330 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อให้เย็นตัวเร็วจะมีความเหนียวและตัดได้ พลาสติกนี้ไม่สามารถเชื่อมประสานหรือติดกาวได้ แต่ใช้ปาดผิวได้ (มานพ ดันตระบัณฑิตย์ 2548 : 298) ประโยชน์ ทำรองเพลลาที่ไม่ต้องใช้น้ำมันหล่อลื่น เรือบิน เมมเบรนสำหรับปั๊ม ลีน ปะเก็น อุปกรณ์เคมี และเคลือบผิวสำหรับภาชนะทำอาหาร เป็นต้น



ภาพที่ 25 กระทะที่เคลือบด้วยเทฟลอน

ที่มา : NeoEase [pseud.], Kitchen Basics 101 – Tricks of the Trade [Online], accessed 21 January 2012. Available from <http://saucymoi.wordpress.com/>

4.1.6 โพลีเอสเตอร์แบบเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic polyester)

เป็นพลาสติกที่ความเหนียว ความแข็งแรง ความทนทานต่อการขีดสี ความทนทานต่อสารเคมี และดูดซึมน้ำต่ำ ส่วนใหญ่ที่ใช้งาน ได้แก่ โพลีเอทิลีนเทอเรพทาเลต (polyethylene terephthalate) อักษรย่อ PET และโพลิบิวทีลีนเทอเรพทาเลต (polybutylene terephthalate) อักษรย่อ PBT จะใช้ในการผลิตเฟือง ชุดลูกปืน รอก สวิตช์ และฝาครอบต่างๆ เป็นต้น (จินตมัย สุวรรณประทีป 2547 : 6)



ภาพที่ 26 โพลีเอสเตอร์แบบเทอร์โมพลาสติกนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนของหลังคาถังแก๊สของรถ

ที่มา : DE Wilmington, Automotive News [Online], accessed 21 January 2012. Available from http://www2.dupont.com/Automotive/en_US/news_events/article20050815.html

4.1.7 โพลีอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (polyetheretherketone)

โพลีเอเทอร์อีเทอร์คีโตน ใช้ชื่อย่อ PEEK มีความหนาแน่นประมาณ 1.3 g/cm^3 มีความแข็งแรง ความแข็งแรง ความเหนียว ความทนทานต่อสารเคมีและทนทานต่อความถี่สูง นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้ดี สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (จันทม์ย สุวรรณประทีป 2547 : 6) โดยทั่วไปใช้ในการผลิตเป็นชิ้นส่วนคอนเนกเตอร์อุปกรณ์ไฟฟ้า ไขพัด และเส้นใย เป็นต้น



ภาพที่ 27 สายรัดที่ทำจาก โพลีเอเทอร์อีเทอร์คีโตน

ที่มา : [PEEK Cable Ties](http://accuglassproducts.com/product.php?productid=16966) [Online], accessed 21 January 2012. Available from <http://accuglassproducts.com/product.php?productid=16966>

4.1.8 โพลีไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride)

ชื่อย่อ PVC มีความหนาแน่น 1.35 g/cm^3 ลักษณะไม่มีสี โปร่งใส ย้อมสีได้ มีความเป็นฉนวนไฟฟ้า เมื่อติดไฟแล้วสามารถดับได้ด้วยตัวเอง ทนต่อน้ำมัน จาระบี กรดและด่าง สามารถละลายในสารละลายบางชนิดได้ เช่น ไตรคลอเอทิลีน (trichlorethylene) และคาร์บอนเตตราคลอไรด์ (carbon tetrachloride) ตามสภาพเดิม PVC จะแข็ง เมื่อใช้สารทำให้อ่อนตัว (softener) สามารถปรับให้ได้ตามคุณสมบัติที่ต้องการในขณะทำการผลิต พลาสติกนี้จะนำมาฉีดขึ้นรูป ปาดผิวและติดกาวได้ โพลีไวนิลคลอไรด์มี 2 ประเภท ดังนี้ (มานพ ต้นตระบันพิศย์ 2548 : 293)

4.1.8.1 โพลีไวนิลคลอไรด์แบบแข็ง (rigid polyvinyl chloride)

PVC แข็ง จะแข็งและเหนียว แตกหักยาก สามารถทำการขึ้นรูปขณะร้อนได้ง่าย เชื่อมประสานได้ สามารถรักษารูปร่างได้ถึงราว $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ มีความต้านแรงดึงประมาณ 50 N/mm^2 ประโยชน์

ใช้ผลิตเป็นท่อน้ำสุกักกัน ชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่ทนสารเคมี กรอบหน้าต่าง บัตรเครดิต เรือยนต์ ลื่น ภาชนะ ท่อฉนวนเดินสายไฟฟ้า แผ่นพลาสติกบาง และรูปพรรณต่างๆ เป็นต้น



ภาพที่ 28 กรอบพลาสติกของสมาร์ตโฟนที่ทำมาจาก PVC แข็ง

ที่มา : [Case in polyvinyl chloride for iPhone 4/4S](http://www.sbs-power.com/iphone/protections_cover/734_case-in-polyvinyl-chloride-for-iphone-44s_TE8SCB40B.html) [Online], accessed 21 January 2012. Available from http://www.sbs-power.com/iphone/protections_cover/734_case-in-polyvinyl-chloride-for-iphone-44s_TE8SCB40B.html

4.1.8.2 โพลีไวนิลคลอไรด์แบบอ่อน (plasticized polyvinyl chloride)

PVC อ่อน ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารทำให้อ่อนตัว ที่ผสมเข้าไปให้อ่อนจากเหมือนยางจนถึงเหนียวเหมือนหนัง สามารถรักษารูปทรงได้ถึง 60 °C ตีคกาวได้ไม่ค่อยดี มีความต้านแรงดึงประมาณ 20 N/mm² ประโยชน์ ใช้ทำหนังเทียม ฟองน้ำแผ่นเช็ดโต๊ะ ท่อสายพลาสติก รองเท้าหุ้มขา ถุงมือป้องกัน สายพานลำเลียง สายเคเบิล ฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า แผ่นยางปูพื้น ฝักดาและเครื่องมือแพทย์ เป็นต้น

คำแนะนำ ผลิตภัณฑ์ที่ทำจาก PVC เช่น หนังเทียมสามารถล้างทำความสะอาดได้ด้วยสบู่หรือเบนซิน ในการเผาไหม้จะเกิดก๊าซพิษกรดเกลือขึ้น



ภาพที่ 29 กรอบตานิรภัยที่ทำจาก PVC อ่อน

ที่มา : Neonglow [นามแฝง], กรอบตานิรภัย GOG-NA-01 [Online], accessed 21 January 2012.
Available from <http://www.sgbksafebiz.com/category/safety-products/eye-protection/eyes-protection-goggle/>

4.1.9 โพลีเมทิลเมทาคริเลต (polymethyl methacrylate)

โพลีเมทิลเมทาคริเลต หรืออะคริลิกกลาส อักษรย่อ PMMA มีชื่อเรียกตามท้องตลาดว่า เพลลิกซิกกลาส (plexiglass) มีความหนาแน่น 1.08 g/cm^3 ลักษณะไม่มีสี ใสเหมือนแก้ว มีผิวเป็นเงาวาว ย้อมสีได้ ทนต่อแดด (ไม่เกิดเป็นสีเหลือง) แสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านได้ ทนต่อบรรยากาศและการเสื่อม (ageing) เหมาะสำหรับใช้งานกลางแจ้งได้ถาวร ทนต่อกรด ด่าง สารละลายเกลือ น้ำมัน และเบนซิน แต่เบนโซลและแอลกอฮอล์จะกัดกร่อนได้ พลาสติกนี้แข็งและเหนียว เมื่อแตกหักจะไม่เกิดเศษแหลมๆ ไม่เปราะเหมือนแผ่นกระจกใหญ่ (แก้วซิลิกอน) มีความต้านแรงดึงประมาณ 70 N/mm^2 รักษารูปทรงได้ถึง $90 \text{ }^\circ\text{C}$ และที่ $130 \text{ }^\circ\text{C}$ สามารถขึ้นรูปได้ง่าย (มานพ ดันตระกูล 2548 : 296-297) นำมาปาดผิว ตัดกาวเชื่อมประสานได้ ประโยชน์ ส่วนใหญ่ใช้ทำแผ่นกั้นนิรภัย อุปกรณ์เขียนแบบ แผ่นแก้วอุปกรณ์เครื่องวัด แผ่นกระจกแทนเจียระไน และตามบริเวณเครื่องจักรกล ฝาครอบไฟท้าย ไฟเลี้ยวยานยนต์ ป้ายสัญญาณคอมพิวเตอร์ แวนตา เลนส์ ถ้วย หน้ากาก ป้ายชื่อและของใช้ในงานสุขภัณฑ์ เป็นต้น



ภาพที่ 30 รถคันแรกที่มีกระจกหน้ารถเป็นพลาสติกกลาส

ที่มา : [Evonik: First car windshield made of PMMA](http://plasticer.de/news/shownews_en.php?nr=12280&nmin=100&div=&special=&select=&sort=&begriff=&nmax=100&stag=&smon=&sjahr=&etag=&emon=&ejahr=&backto=/news/index_en.php) [Online], accessed 21 January 2012.

Available from http://plasticer.de/news/shownews_en.php?nr=12280&nmin=100&div=&special=&select=&sort=&begriff=&nmax=100&stag=&smon=&sjahr=&etag=&emon=&ejahr=&backto=/news/index_en.php

4.1.10 โพลีสไตรีน (polystyrene)

อักษรย่อ PS มีความหนาแน่น 1.05 g/cm^3 ในสภาพบริสุทธิ์จะไม่มีสี โปร่งใส มีผิวเป็นเงาวาว ย้อมสีได้ ทนต่อกรด ค้าง สารละลายเกลือ น้ำและน้ำมันได้ แต่ไม่ทนต่อเบนซีน เบนโซล และสารละลายอินทรีย์อื่นๆ มีความต้านแรงดึงประมาณ 55 N/mm^2 รักษารูปทรงได้ถึง $80 \text{ }^\circ\text{C}$ และเปราะตั้งแต่ประมาณ $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ ลงไป ไวต่อแรงกระแทกและแรงทุบ พลาสติกนี้สามารถผลิตแบบฉีดในแม่พิมพ์ มีคุณสมบัติไดอิเล็กทริกดี (مانพ ต้นตระกูล พลาสติก 2548 : 295) ประโยชน์ ทำตู้กระจก กระจก กระจกป้องกัน แผ่นปิด กระจกอกเข็มฉีดยา ปลูกปากกา ไม้บรรทัด และรีเลย์ เป็นต้น



ภาพที่ 31 พลาสติกชนิดต่างๆที่ทำมาจากโพลีสไตรีน

ที่มา : พลาสติกในชีวิตประจำวัน [Online], accessed 26 January 2012. Available from <http://kanchanapisek.or.th/kp6/New/sub/book/book.php?book=28&chap=8&page=t28-8-infodetail06.html>

4.1.11 อะคริโลไนไตร-บิวตาไดอิน-สไตรีน (acrylonitrile-butadiene-styrene)

อักษรย่อ ABS มีความหนาแน่น 1.05 g/cm^3 มีความเหนียว ทนต่อการทุบเป็นอย่างดี แต่ไม่ทนต่อสารเคมีบางประเภท เช่น กรด ด่าง คีโตน เอสเทอร์ เป็นต้น มีความต้านแรงดึง 56 N/mm^2 อุณหภูมิใช้งานได้ถึง $80 \text{ }^\circ\text{C}$ สามารถผลิตเป็นชิ้นส่วนด้วยวิธีฉีดในแม่พิมพ์ ปาดผิว ตัดกาวได้ จะไม่ใช่ทำการเชื่อมประสาน (มานพ ตันตระบัณฑิตย์ 2548 : 296) ประโยชน์ ใช้ผลิตชิ้นส่วนบริเวณ บอร์ดอุปกรณ์ ใบบัดลม หมวกกันน็อก ฝาครอบโทรทัศน์ โทรศัพท คอมพิวเตอร์และกระเป๋าเดินทาง เป็นต้น

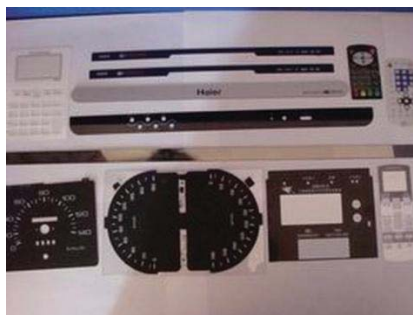


ภาพที่ 32 กันชนหน้าที่เป็น ABS

ที่มา : JadeSeven [นามแฝง], ชุดแต่ง Plastic ABS สำหรับ Mitsubishi ECar, CK, Cedia, New Lancer, EX [Online], accessed 26 January 2012. Available from <http://www.lancerclub.net/forum/index.php?topic=109284.0>

4.1.12 โพลีคาร์บอเนต (polycarbonate)

อักษรย่อ PC มีความหนาแน่น 1.2 g/cm^3 ลักษณะใสเหมือนแก้ว ผิวเป็นเงาวาว ย้อมสีได้ แข็ง เหนียว ทนต่อการทุบ ทนต่อกรด แต่ไม่ทนต่อด่างและสารละลายเกลือหรือสารละลายอื่นๆ สามารถรักษารูปทรงได้อย่างต่ำสุด $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ มีความแข็งแรงถึง $-100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ มีความต้านแรงดึงประมาณ 70 N/mm^2 ขึ้นรูปด้วยความร้อนได้ดี โดยสามารถเสริมใยแก้วได้ เมื่อทำการละลายในเมทิลีนคลอไรด์ (methylene chloride) สามารถใช้เป็นสีหรือฟิล์มเคลือบวัสดุอื่นได้ ขึ้นรูปโดยการฉีดในแม่พิมพ์ หล่อแบบต่อเนื่อง ปาดผิวและเชื่อมประสานได้ (มานพ ตันตระกูล 2548 : 298-299) ประโยชน์ ทำตัวเรือนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้า ไขว้คดลม ปุ่ม สวิตช์ไฟฟ้า ปลั๊กเสียบ อุปกรณ์แพทย์ ขวดนม ของใช้ในครัวเรือน ชิ้นส่วนปุ่มหอยโข่ง ชิ้นส่วนกล้องถ่ายภาพ แผ่นซีดีและฉนวนกันเสียง เป็นต้น



ภาพที่ 33 โพลีคาร์บอเนตที่นำมาใช้ทำวัสดุต่างๆ

ที่มา : Kitchen Basics 101 – Tricks of the Trade [Online], accessed 26 January 2012. Available from http://www.supplierlist.com/product_view/jmgykj/93040/100418/polycarbonate_sheets.htm

4.1.13 โพลีเอเทอร์ซัลโฟน (polyethersulfone)

เป็นพลาสติกวิศวกรรมที่ทนทานต่อความร้อนสูงได้ดี มีสมบัติติดไฟต่ำ สามารถผลิตได้ง่าย โดยทั่วไปใช้ในการผลิตเป็นท่อไอเสียของเครื่องยนต์ ชุดลูกปืน หน้ากาก มือจับของเครื่องมือ และเคลือบผิวป้องกันการกัด เป็นต้น (จินตมัย สุวรรณประทีป 2547 : 7)



ภาพที่ 34 ตัวกรองแบบต่างๆที่ผลิตจากโพลีเอเทอร์ซัลโฟน

ที่มา : Hollow Submerged Membrane [Online], accessed 26 January 2012. Available from <http://www.nordgroup.com.cn/product2.htm>

4.1.14 โพลีไอมิด (polyimide)

โพลีไอมิด มีความหนาแน่น 1.43 g/cm^3 มีความต้านแรงดึง 90 N/mm^2 และที่อุณหภูมิ $300 \text{ }^\circ\text{C}$ จะยังมีความต้านแรงดึงถึง 45 N/mm^2 สามารถนำไปใช้งานชั่วคราวที่อุณหภูมิ $-240 \text{ }^\circ\text{C}$ ถึง

500 °C ในบรรยากาศสามารถใช้งานได้ที่ 260 °C ได้อย่างถาวร ในสุญญากาศหรือในก๊าซเฉื่อยโดยใช้งานได้ถึง 340 °C มีความลื่น มีความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าสูง ทนต่อกรดอ่อน ด่างหรือสารละลายหลายชนิดได้ เนื่องจากอุณหภูมิอ่อนตัวสูงมากจึงไม่สามารถขึ้นรูปให้ครากตัวตามความร้อนได้ พลาสติกนี้จึงใช้ทำการขึ้นเตอริง ปาดผิวและติดกาวได้ดี (มานพ ตันตระบัณฑิตย์ 2548 : 299) ประโยชน์ ใช้ทำประกัน รองเพลลาของระบบไอพ่น ตำแหน่งงานที่รับความร้อนและมีราคาแพง เป็นต้น



ภาพที่ 35 วงจรไฟฟ้าที่ทำด้วยโพลีอไมด์

ที่มา : [Polyimide heater 18.60 W/cm²](http://www.directindustry.com/prod/minco/polyimide-heaters-5076-475766.html) [Online], accessed 26 january 2012. Available from <http://www.directindustry.com/prod/minco/polyimide-heaters-5076-475766.html>

4.1.15 สไตรีน-บутаไดอิน (styrene-butadiene)

สไตรีน-บутаไดอิน อักษรย่อ SB มีความหนาแน่น 1.05 g/cm³ มีความเหนียวทนต่อแรงทุบ มีความต้านแรงดึงสูงถึง 56 N/mm² มีอุณหภูมิใช้งานได้ถึง 85 °C ทั้งนี้เนื่องจากการนำสไตรีนไปผสมกับยางยืดหยุ่นบутаไดอิน ทำให้เกิดความเหนียว แตกยาก โปร่งใสเหมือนแก้ว มีผิวมัน เป็นเงา (มานพ ตันตระบัณฑิตย์ 2548 : 295-296) พลาสติกนี้จะผลิตเป็นชิ้นส่วนด้วยวิธีฉีดในแม่พิมพ์ จะไม่ใช้วิธีการเชื่อมประสาน แต่ขึ้นรูปขณะร้อน ปาดผิวและติดกาวได้ ประโยชน์ ใช้ผลิตฝาปิดเครื่องจักร เรือน ภาชนะ ปุ่มกด ภาชนะขนส่งและชิ้นส่วนทางไฟฟ้า เป็นต้น



ภาพที่ 36 สไตรีน-บิวตาไดอีนสามารถนำมาทำเป็นยางรถยนต์ได้

ที่มา : [Properties of Styrene-Butadiene Rubber](http://www.ehow.co.uk/info_8633410_properties-styrenebutadiene-rubber.html) [Online], accessed 26 January 2012. Available from http://www.ehow.co.uk/info_8633410_properties-styrenebutadiene-rubber.html

4.1.16 เซลลูโลสอะซีเตต (celluloseacetate)

เซลลูโลสอะซีเตต อักษรย่อ CA มีความหนาแน่น 1.2 g/cm^3 เป็นวัสดุได้มาจากธรรมชาติ ในสภาพบริสุทธิ์จะใสเหมือนแก้ว มีผิวเป็นเงาวาว กัดฉนวนซึ่งได้ แข็งปานกลาง เหนียว ทนต่อแรงทุบ ทนต่อเบนซีน ทนต่อไตรคลอเอทีลีนและคาร์บอนเตตราคลอไรด์ แต่ไม่ทนต่ออะซีโตน กรดและด่าง ทนต่อการขีดข่วน มีความต้านแรงดึงประมาณ 60 N/mm^2 มีอุณหภูมิใช้งานอยู่ระหว่าง $-60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (मानप तनत्रबन्धकित्य 2548 : 300) ประโยชน์ ใช้ทำกั้วรถยนต์ ด้ามจับเครื่องมือ อุปกรณ์ในครัวเรือนและชิ้นส่วนทางไฟฟ้า เป็นต้น



ภาพที่ 37 ก้นกรองบุหรี่ที่ทำจากเซลลูโลสอะซิเตต

ที่มา : StorminMatt [pseud.], Fiberglass in Newport (Tokyosmash!) [Online], accessed 26
 janyary 2012. Available from <http://honda-tech.com/showthread.php?t=2310278>

นอกจากนี้ เทอร์โมพลาสติกสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็นอีก 2 ประเภท คือ พลาสติกกึ่งผลึก (semi-crystalline) และพลาสติกอสัณฐาน (amorphous) โดยพลาสติกอสัณฐานจะมีโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่เป็นระเบียบ มีลักษณะทั่วไป คือ แข็ง ใส และเปราะ ในขณะที่พลาสติกกึ่งผลึกนั้นจะมีโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลที่เป็นระเบียบ แต่ไม่ทั้งหมดจึงทำให้ภายในโครงสร้างมีทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐาน พลาสติกในกลุ่มนี้จะมีสมบัติทั่วไปที่ยืดหยุ่นและเหนียวพอสมควร (จินตมัย สุวรรณประทีป 2547 : 5) ดังตารางต่อไปนี้ซึ่งเป็นตัวอย่างของพลาสติกกึ่งผลึกและพลาสติกอสัณฐาน

ตารางที่ 1 ตัวอย่างของพลาสติกกึ่งผลึกและพลาสติกอสัณฐาน

พลาสติกกึ่งผลึก	พลาสติกอสัณฐาน
โพลีเอทีลีน	โพลีไวนิลคลอไรด์
โพลีโพรไพลีน	โพลีเมทิลเมทาคริเลต
โพลีเอไมด์	โพลีสไตรีน
โพลีออกซิเมทีลีน	อะครีโลไนไตร-บูตาไดเอน-สไตรีน
โพลีเตตราฟลูออโรเอทีลีน	โพลีคาร์บอนเนต

พลาสติกกึ่งผลึก	พลาสติกอสัณฐาน
โพลีเอสเตอร์แบบเทอร์โมพลาสติก	โพลีเอเทอร์ซัลโฟน

4.2 พลาสติกแข็ง (Thermosetting Plastics)

พลาสติกในกลุ่มนี้จะมีรูปทรงถาวรเมื่อผ่านกรรมวิธีผลิต และไม่สามารถเปลี่ยนรูปร่างกลับไปกลับมาใหม่โดยการให้ความร้อนเหมือนกับพลาสติกในกลุ่มเทอร์โมพลาสติก ทั้งนี้เนื่องจากก่อนกระบวนการผลิต โครงสร้างของพลาสติกจะยังเป็นสายโซ่โมเลกุลที่สามารถเคลื่อนที่ได้ แต่เมื่อผ่านกระบวนการผลิตแล้วจะมีการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างเกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลในลักษณะสามมิติด้วยพันธะโควาเลนต์ซึ่งมีความแข็งแรง จึงมีผลทำให้เทอร์โมเซตติงนี้ไม่สามารถใช้ความร้อนเพื่อหลอมเหลวได้ แต่จะไหม้และเสื่อมสภาพไป มีสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม เปรียบง่ายๆ คล้ายกับไข่เจียวซึ่งจะไม่กลับไปเป็นของเหลวอีกเมื่อได้รับความร้อน แต่จะไหม้เกรียม หากทิ้งไว้นานเกินไป ซึ่งข้อดีของพลาสติกในกลุ่มนี้ คือ มีความแกร่งแข็งแรงสูง และทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้ดี ในประเทศอังกฤษเรียกเทอร์โมเซตติงอีกชื่อหนึ่งว่า ดูโรพลาสติก (duroplastics) (พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์ 2537 : 73)

4.2.1 ฟีนอลิกเรซิน (phenolic resin หรือ phenolic formaldehyde)

ฟีนอลิกเรซิน อักษรย่อ PF มีความหนาแน่น 1.5 g/cm^3 ในสภาพบริสุทธิ์มีสีน้ำตาลเหลือง ไม่โปร่งใส ย้อมสีได้ จะมีสีคล้ำลงไปเรื่อยๆ ไปตามกาลเวลาและมีกลิ่นไม่น่าดม จะเกิดผิวหนังและจับผิวหนังจะไม่หาย การชุบแข็งตกตะกอนที่อุณหภูมิห้องกระทำด้วยการใส่สารแข็งตัว (hardener) พลาสติกนี้ทนต่อสารละลาย และน้ำ แต่ไม่ทนต่อกรดแก่และด่าง มีความแข็งและเปราะ มีค่าความต้านแรงดึง 28 N/mm^2 การสลายตัวจะเกิดที่ $100 \text{ }^\circ\text{C}$ เมื่อใช้งานเป็นเวลานาน เมื่อผสมกับวัสดุอื่นจะกลายเป็นแผ่นแบคาไลต์ (bakelite) ได้ (มานพ ตันตระบัณฑิตย์ 2548 : 304) พลาสติกนี้สามารถทำการอัดและทำการฉีดในแม่พิมพ์ได้ ปาดผิวและติดกาวได้ ประโยชน์ ในสภาพบริสุทธิ์

ใช้เป็นกาสำหรับไม้และตัวประสานสำหรับสี ส่วนใหญ่จะผสมกับฟิลเลอร์ (filler) นำมาทำเป็นวัสดุแม่พิมพ์อัด (compression moulding material) พลาสติกชนิดชั้น (laminated plastics) จะใช้ทำเป็นคันโยก เรือรบ ร่องเพลลา ชิ้นส่วนทางไฟฟ้า และชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น



ภาพที่ 38 แบคาไลต์แบบต่างๆ

ที่มา : Guy Newell, BAKELITE [Online], accessed 26 january 2012. Available from <http://www.nimrodplastics.com.au/product-bakelite.htm>

4.2.2 ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (urea-formaldehyde resin)

ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน อักษรย่อ UF มีความหนาแน่น 1.5 g/cm^3 มีคุณสมบัติคล้ายกับฟีนอลิกเรซิน แต่มีข้อดีกว่าคือไม่มีสี ทนต่อแสง ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ข้อเสียเมื่อเปรียบกับฟีนอลิกเรซินคือ ทนความร้อนและความชื้นได้น้อยกว่า (มาตรฐาน ตันตระบัณฑิตย์ 2548 : 305) ประโยชน์ ใช้ทำชิ้นส่วนที่มีสีสว่าง น้ำมันชักเงา สี ใช้ทำเป็นวัสดุแม่พิมพ์อัด สวิตซ์ไฟฟ้า ปลั๊กและภาชนะอาหาร เป็นต้น



ภาพที่ 39 สิ่งของที่ทำจากยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน

ที่มา : Science Museum, Personal and domestic accessories made of urea formaldehyde, 1930-1960. [Online], accessed 26 January 2012. Available from <http://www.sciencemuseum.org.uk/images/I015/10276753.aspx>

4.2.3 เมลามีนเรซิน หรือเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ (melamine resin or melamine formaldehyde)

เมลามีนเรซิน หรือเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ อักษรย่อ MF มีความหนาแน่น 1.5 g/cm^3 มีคุณสมบัติคล้ายกับฟีนอลิกเรซิน แต่จะทนต่อการต้มและทนแสง ในการผลิตจะใช้สัดส่วนของโมล เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ = 1:1.5 ... 3 (मानव दन्तचिकित्सा 2548 : 305) ประโยชน์ คล้ายกับยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ เหมาะใช้เป็นภาชนะใส่อาหาร น้ำดื่ม ของใช้ในครัวเรือน แผ่นกระดาษแข็ง น้ำมันชักเงาและกาว เป็นต้น



ภาพที่ 40 ภาพต่างๆที่ผลิตจากเมลามีนเรซิน

ที่มา : M [pseud.], What is Melamine? [Online], accessed 26 January 2012. Available from <http://cat-chitchat.pictures-of-cats.org/2009/02/what-is-melamine.html#!/2009/02/what-is-melamine.html>

4.2.4 โพลีเอสเตอร์ไม่อิ่มตัว (unsaturated polyester)

โพลีเอสเตอร์ไม่อิ่มตัว อักษรย่อ UP มีความหนาแน่น 1.2 g/cm^3 การชุบแข็งตกตะกอน จะกระทำด้วยการใส่สารแข็งตัวและตัวเร่งปฏิกิริยา โดยไม่ต้องใช้ความดันและความร้อน จึงเรียกว่า เรซินหล่อ ทนต่อกรดอ่อนๆ ด่าง และสารละลายเกลือ ทนต่อสารละลายได้หลายชนิด แล้วแต่ วิธีการผลิต จะทำให้มีสภาพแข็ง เปราะถึงอ่อนและยืดหยุ่น ในสภาพแข็งจะมีความต้านแรงดึง 15 N/mm^2 การสลายตัวจะเริ่มจากอุณหภูมิมากกว่า $100 \text{ }^\circ\text{C}$ (मानप दान्तरबन्धत्थि 2548 : 306) เมื่อใช้งานเป็นเวลานาน ประโยชน์ ใช้เป็นกาวติดโลหะ เป็นน้ำมันชักเงาที่แห้งเร็ว ใช้งานที่ต้องทนต่อการขีดข่วน ใช้เป็นเรซินหล่อในงานทำหุ่นแสดง หรือใช้หุ้มชิ้นงานเพื่อขจัดโครงสร้างจุลภาคของโลหะ สามารถนำไปปัดในแม่พิมพ์ ดัดกาว ปาดผิวได้แต่เชื่อมประสานไม่ได้ เป็นต้น



ภาพที่ 41 กระจุกที่ทำมาจากโพลีเอสเตอร์ไม่อิมตัว

ที่มา : [Unsaturated polyester resin](http://www.alibaba.com/product-gs/441022139/Unsaturated_polyester_resin.html) [Online], accessed 26 January 2012. Available from http://www.alibaba.com/product-gs/441022139/Unsaturated_polyester_resin.html

4.2.5 อีพ็อกซีเรซิน (epoxy resin)

อีพ็อกซีเรซิน อักษรย่อ EP มีความหนาแน่น 1.2 g/cm^3 ทำเป็น pre-product สภาพเหลวหรือแข็ง ใช้ในการค้าได้ ในสภาพเหลวจะมีพิษ ไอของมันจะกัดผิวหนัง ในสภาพชุบแข็งแล้วไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส การชุบแข็งตกตะกอนกระทำโดยการใส่สารแข็งตัว ที่อุณหภูมิห้องจะเป็นการชุบแข็งตกตะกอนเย็น แต่ที่ระหว่าง $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $220 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จะเป็นการชุบแข็งตกตะกอนร้อน ในสภาพเหลวจะเหลวใสบาง จึงเหมาะทำเรซินหล่อได้ดี เพราะแทรกเข้าไปในช่องเล็กๆได้ มีคุณสมบัติพิเศษ คือ สามารถจับเกาะวัสดุอื่นได้เกือบทุกชนิด ทนการกัดกร่อนได้ดีมาก ทนต่อการกัดเซาะของกรด ด่าง สารละลายเกลือ และสารละลายอื่นๆ มีอุณหภูมิทำงานแบบต่อเนื่องระหว่าง $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ในสภาพชุบแข็งตกตะกอนจะแข็งเหนียวและแตกหักยาก มีค่าความต้านแรงดึงถึง 40 N/mm^2 (मानप दान्तरबन्धतित्थ 2548 : 307-308) พลาสติกนี้ใช้หล่อและอัดขึ้นรูปได้ ปาดผิวติดกาวได้ ไม่เหมาะกับการเชื่อมประสาน ประโยชน์ ทำสวิตช์ชิ้นส่วนอุปกรณ์ กาวและเรซินสำหรับสี เป็นต้น



ภาพที่ 42 เป็นภาพวาดโดยใช้สีที่ผลิตจากอียิปต์เรซิน

ที่มา : Eung-Ho Park, I am Looking at You [Online], accessed 26 January 2012. Available from <http://www.edwardwinkleman.com/2005/05/artist-of-week-052305.html>

4.2.6 โพลียูเรเทน (polyurethane)

โพลียูเรเทน อักษรย่อ PUR มีความหนาแน่น 1.26 g/cm^3 มีคุณสมบัติเกาะจับผิวชนิดอื่นได้เกือบทุกชนิด ทนต่อกรดอ่อน ต่าง สารละลายเกลือ และสารละลายหลายชนิด คุณสมบัติทางกลจะเปลี่ยนไปตามดิวรีโมเลกุลตาข่าย โพลียูเรเทนที่มีโมเลกุลตาข่ายแคบจะแข็งและหยุ่นเหนียว (เป็นพลาสติกแข็ง) ส่วนโมเลกุลที่มีตาข่ายกว้างจะอ่อนและหยุ่นเหมือนยาง (พลาสติกยืดหยุ่น) โพลียูเรเทนแข็งมีค่าความต้านแรงดึงประมาณ 60 N/mm^2 ส่วนโพลียูเรเทนอ่อนประมาณ 40 N/mm^2 (मानप दान्तरबन्धतित्थ 2548 : 308) พลาสติกนี้สามารถทำการฉีดในแม่พิมพ์ อัดรีดได้ อัดกาวและ ปาดผิวได้ ประโยชน์ โพลียูเรเทนแข็งหรือโฟมแข็งใช้ทำเปลือกกรองเพลลา บู๊ช เฟือง ฉนวนความร้อน โพลียูเรเทนแข็งปานกลางหรือโฟมนิ่ม ใช้ทำกันชนของรถยนต์นั่ง ลูกกลิ้ง โพลียูเรเทนอ่อนใช้ทำฟองน้ำใส่เก้าอี้ โซฟา เตียงนอน สภาพเปือกจะใช้ทำเสื่อน้ำมัน สภาพแห้งจะใช้ทำปะเก็น เมมเบรน ชิ้นส่วนคลัตช์ น้ำมันเคลือบเงาและกาวติดวัสดุ เป็นต้น



ภาพที่ 43 พลาสติกส่วนริมฝีปากของกันชนหน้าทำมาจากโพลียูเรเทน

ที่มา : *NEW* PU Design Polyurethane Front Lip Mazda MX5 90/97 [Online], accessed 26
 janyary 2012. Available from <http://www.fullcartuning.nl/details.php?intID=43441&setlang=EN>

4.2.7 ซิลิโคน (silicone)

ซิลิโคน อักษรย่อ SI มีความหนาแน่น 1.2 - 2.3 g/cm³ จัดอยู่ในกลุ่มพลาสติก เมื่อเป็นน้ำมันจะมีสภาพความหนืดต่ำถึงสูง โครงสร้างโมเลกุลที่มีตาข่ายกว้างจะหยุ่นเหนียว ส่วนโมเลกุลตาข่ายที่แคบจะแสดงคุณสมบัติไปทางพลาสติกแข็ง ส่วนประกอบหลักของซิลิโคนได้แก่ ซิลิคอน (วัตถุดิบควอตซ์) และออกซิเจน รวมตัวกันทางเคมี ซิลิคอนนี้จะทนต่อน้ำมันแร่ และสารละลายกัดเซาะได้เป็นบางส่วน กรด ค่าง สามารถทำลายได้ ประโยชน์ ซิลิโคนปาส (paste) ใช้เป็นวัสดุกันรั่วซึมได้ถึงอุณหภูมิ 200 °C โรงงานสีจะใช้ซิลิโคนเป็นส่วนใหญ่ น้ำมันซิลิโคนจะใช้ในการช่วยแกะชิ้นงานพลาสติกให้หลุดจากแม่พิมพ์ได้ง่ายอีกด้วย (มานพ ต้นตระบันฑิตย์ 2548 : 308-309)



ภาพที่ 44 กาวซิลิโคน

ที่มา : Jacky Guo, NEUTRAL SILICONE [Online], accessed 26 janyary 2012. Available from <http://www.aluminumcompositepanel.biz/neutral-silicone/>

5. การวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal Analysis)

5.1 นิยามของการวิเคราะห์เชิงความร้อน (Definition of thermal analysis)

การวิเคราะห์เชิงความร้อน (TA) เป็นกลุ่มของเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของสารตัวอย่างเทียบกับเวลาหรืออุณหภูมิ โดยที่สารตัวอย่างจะอยู่ในบรรยากาศเฉพาะที่ได้โปรแกรมไว้ โปรแกรมอาจจะเกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนหรือการทำให้เย็น ด้วยอัตราที่แน่นอนของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปหรือการทำให้อุณหภูมิกคงที่หรือลำดับใดลำดับของสิ่งเหล่านี้

ในปัจจุบันได้มีการนำวิธีการวิเคราะห์เชิงความร้อนไปใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งในส่วนที่เกี่ยวข้องกับทางด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม โดยสามารถนำไปใช้ในการตรวจลักษณะของวัสดุประเภทต่างๆ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ และเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่เป็นที่ยอมรับ

5.2 คุณลักษณะของการวิเคราะห์เชิงความร้อน (Characteristics of thermal analysis)

การวิเคราะห์เชิงความร้อนนั้นมีข้อดีมากมายเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์วิธีอื่นๆ ข้อดีของการวิเคราะห์เชิงความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

- 5.2.1 สามารถศึกษาสมบัติของตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิกว้างได้
- 5.2.2 สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างในสถานะต่างๆ ได้ เช่น ของแข็ง ของเหลว หรือเจล เป็นต้น โดยสามารถเลือกภาชนะที่ใส่ตัวอย่าง (sample vessel) ให้เหมาะสมกับประเภทของตัวอย่าง
- 5.2.3 สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีปริมาณน้อยๆ ได้ ซึ่งมีน้ำหนักตั้งแต่ 0.1 μg จนถึง 10 mg
- 5.2.4 สามารถเลือกวิเคราะห์ในบรรยากาศที่เหมาะสมกับตัวอย่างแต่ละประเภทได้
- 5.2.5 สามารถกำหนดเวลาในการวิเคราะห์ให้เหมาะสมได้ (ตั้งแต่ 2-3 นาที จนถึง 2-3 ชั่วโมง)
- 5.2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงความร้อนส่วนใหญ่มีราคาไม่แพงมากนัก

ในทางวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ส่วนใหญ่มักจะใช้วิธีการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน เพื่อศึกษาอุณหภูมิของการทรานสิชันและพฤติกรรมการเสื่อมสภาพของตัวอย่าง ก่อนที่จะวิเคราะห์ทางด้านสเปกโทรสโกปี ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงความร้อน สามารถเทียบเคียงกับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีสเปกโทรสโกปีได้ (เช่น NMR, FTIR, X-ray diffractometry) ซึ่งจะให้รายละเอียดเกี่ยวกับพฤติกรรมของตัวอย่างก่อนที่จะนำไปศึกษา หรือสืบค้นพฤติกรรมอย่างละเอียดจากกระบวนการทางโมเลกุล ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีสเปกโทรสโกปี นอกจากนี้การวิเคราะห์เชิงความร้อนยังสามารถนำไปศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ เช่น การตกผลึก การเกิดเครือข่าย (network formation) และสัณฐานวิทยา รวมทั้งยังสามารถใช้ในการศึกษาการอบอ่อน (annealing) การเสื่อมสมบัติตามอายุ (aging) และการบ่ม (curing) เป็นต้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์เชิงความร้อน 2 เทคนิค คือ ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริเมตรี (differential scanning calorimetry, DSC) และการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetry analysis, TGA) จึงนำเสนอเพียง 2 เทคนิค ดังต่อไปนี้

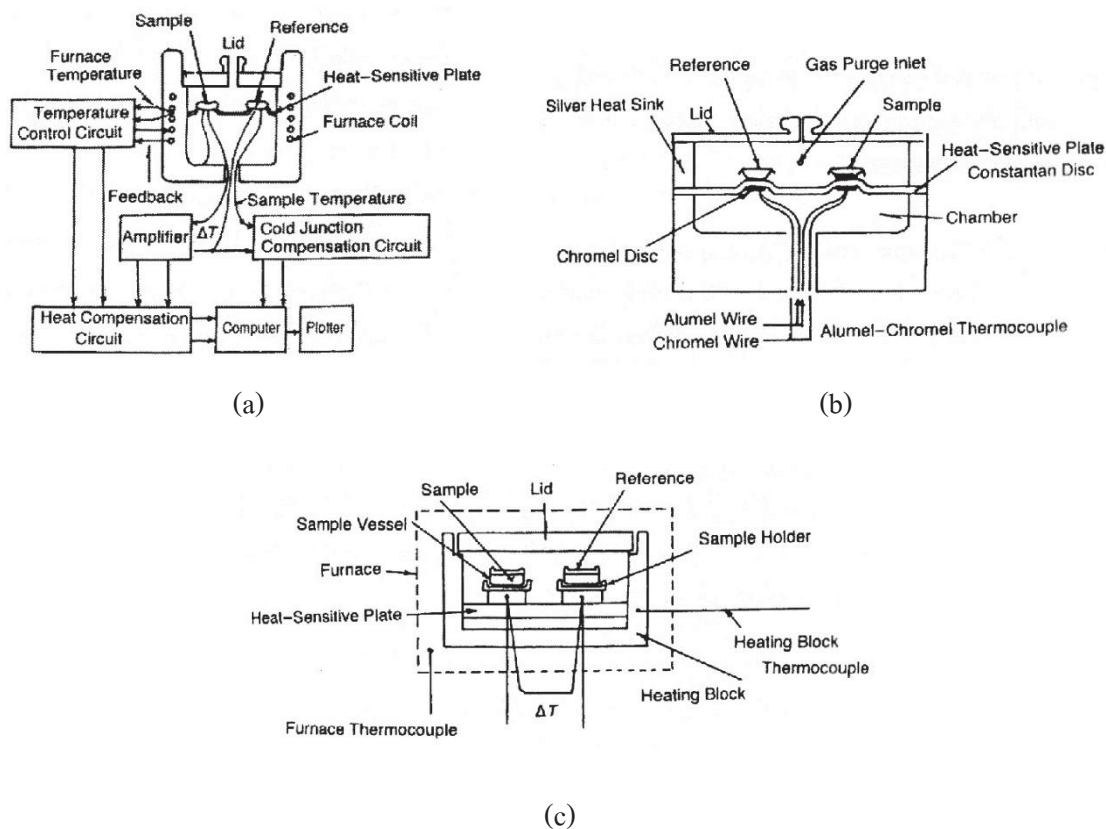
5.3 ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริเมตรี (differential scanning calorimetry, DSC)

เทคนิคการวิเคราะห์ด้วย ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริเมตรี มีอยู่หลากหลายเทคนิค แต่มีอยู่ 2 เทคนิคที่สอดคล้องกับการนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ

5.3.1 ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริเมตรีแบบฟลักซ์ความร้อน (heat flux DSC) หรือการวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบ DTA เชิงปริมาณ (quantitative DTA)

คำว่า ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริเมตรีแบบฟลักซ์ความร้อน (heat flux DSC) นั้นมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการใช้เรียกเครื่อง DTA เชิงปริมาณซึ่งมีขายอยู่ทั่วไปในท้องตลาด โดยจะใช้เครื่องมือนี้วัดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวอย่างและวัสดุอ้างอิงภายใต้ฟังก์ชันของอุณหภูมิหรือเวลา โดยความแตกต่างของอุณหภูมินั้นจะเป็นสัดส่วนกับการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ความร้อน (พลังงานที่ให้ต่อหนึ่งหน่วยเวลา) วัสดุอ้างอิงที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงความร้อนนั้น บางทีอาจจะเข้าใจสับสนกับคำว่า วัสดุอ้างอิงมาตรฐาน (standard reference material) ซึ่งใช้ในการเทียบมาตรฐาน (calibration) ซึ่งมีหลายๆเทคนิคของการวิเคราะห์ที่ใช้วัสดุอ้างอิงและวัสดุอ้างอิงที่มาตรฐานเป็นตัวเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ในกรณีของการวิเคราะห์เชิงความร้อน วัสดุอ้างอิงที่

นำมาใช้ต้องเป็นสารที่เฉื่อยต่อความร้อน นั่นคือ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสในช่วงอุณหภูมิที่ทำการวิเคราะห์ โครงสร้างระบบของเครื่อง heat flux DSC แสดงไว้ในภาพที่ 45



ภาพที่ 45 โครงสร้างระบบของเครื่อง heat flux DSC (a) โครงรูประบบเครื่อง DTA (b) ระบบเครื่อง

DTA ที่ออกแบบโดยบริษัท TA instruments (c) ระบบเครื่อง DTA ที่ออกแบบโดยบริษัท

Seiko instruments

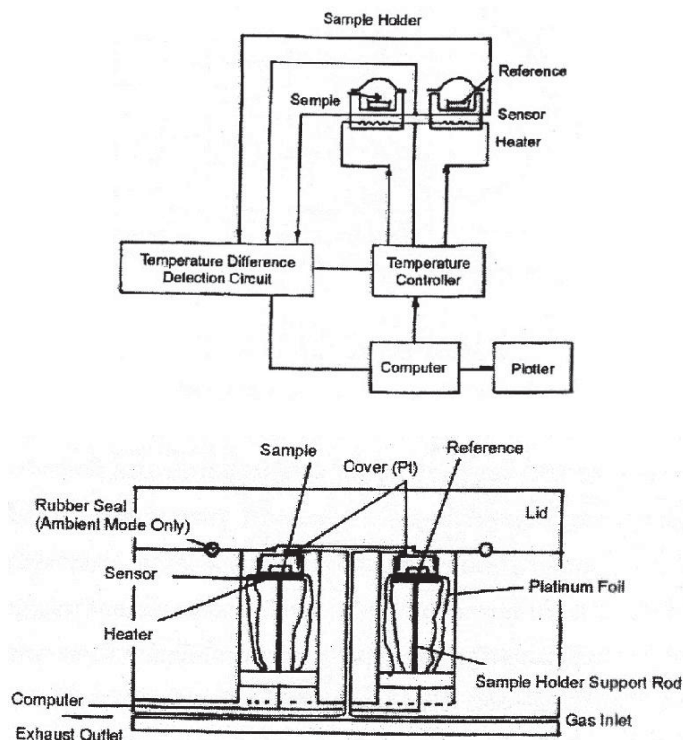
ที่มา : สุนันท์ สายกระสุน, การวิเคราะห์เชิงความร้อน, พิมพ์ครั้งที่ 2 (มหาสารคาม : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2553), 12.

จะเห็นว่าโครงสร้างส่วนประกอบของที่ยึดตัวอย่างจะแตกต่างจากเครื่อง DTA ยุคก่อนๆ โดยบริเวณที่ยึดตัวอย่างจะติดเทอร์โมคัพเปิดไว้ด้านล่างที่ใส่ตัวอย่างและตัวอย่างอิง นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งเทอร์โมคัพเปิดชุดที่สอง เพื่อใช้วัดอุณหภูมิของเตาเผาและแผ่นรองที่ไวต่อความร้อน (heat sensitive plate) ตัวอย่างจะมีการดูดหรือคายความร้อนในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส ทำให้เกิด

การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ความร้อนผ่านแผ่นรองที่ไวต่อความร้อน เมื่อฟลักซ์ความร้อนมีการเปลี่ยนแปลง สามารถวัดความจุความร้อนของแผ่นรองได้โดยใช้วิธีการอิมเมตรีแบบอะเดียบาติก และสามารถนำไปประมาณค่าเอนทัลปีของการทรานซิชันได้ โดยดูจากการขยับขึ้นลงของอุณหภูมิ นอกจากนี้ในการวัดด้วยวิธี heat flux DSC ปริมาณของตัวอย่างควรมีปริมาณน้อยกว่า 10 mg ตัวอย่างควรมีลักษณะแบนและบาง และสามารถวางบนที่วางตัวอย่างได้ ความไวสูงสุดของเครื่องนี้โดยปกติมีค่าเท่ากับ $35 \mu\text{W}$ เตาเผาของเครื่องนี้จะมีขนาดใหญ่ และบางครั้งอาจมีการออกแบบให้สามารถวัดที่อุณหภูมิมากกว่า 1000 K ได้ ซึ่งที่ใส่ตัวอย่างทำมาจากแพลตตินัมหรืออลูมินา อุณหภูมิที่สามารถวัดได้สูงสุดประมาณ 1500 K และสามารถหาเส้นเชื่อมฐาน (baseline) ที่เป็นเส้นตรงได้ง่าย เนื่องจากเตาเผาที่มีขนาดใหญ่ ทำให้บรรยากาศและส่วนประกอบอื่นๆ ที่อยู่รอบๆ ที่ยึดตัวอย่างนั้นร้อนขึ้นได้ง่าย ดังนั้น เวลาใช้ต้องมีความระมัดระวังเป็นพิเศษ นอกจากนี้ความชื้นต่างๆ ไม่สามารถกลั่นตัวได้ (condense) เนื่องจากเตาเผาที่มีขนาดใหญ่ ทำให้สามารถหาเส้นเชื่อมฐานที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้ค่อนข้างง่าย อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของเตาเผาที่มีขนาดใหญ่ก็คือ ในการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิและรักษาอุณหภูมิจึงที่นั้นต้องใช้เวลานาน เช่น เมื่อตั้งโปรแกรมให้อุณหภูมิลดลงจาก 770 K เป็น 300 K เวลาที่ใช้ประมาณ 30 – 100 s ก่อนที่จะเข้าสู่สมดุล นอกจากนี้ต้องหลีกเลี่ยงการเกิด overshooting โดยปรับส่วนอินทิกรัลเชิงอนุพันธ์ของโปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม (proportional integral differential (PID) temperature control program) โดยเฉพาะกรณีที่วัดแบบอุณหภูมิกงที่ ซึ่งจะต้องให้ความร้อนก่อนด้วยอัตราที่สูง เมื่อเกิด overshooting จะทำให้การวัดความจุความร้อนทำได้ยากมากขึ้น ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเตาเผาและตัวอย่างจะมีค่ามาก เมื่อมีการให้ความร้อนหรือความเย็น โดยเฉพาะเมื่อให้อัตราการให้ความร้อนหรือความเย็นสูงๆ เมื่ออุณหภูมิเตาเผามีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิที่ตั้งไว้ เครื่องก็จะหยุดสแกน อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปอุณหภูมิของตัวอย่างจะน้อยกว่าอุณหภูมิของเตาเผเล็กน้อย ดังนั้นก่อนที่จะวิเคราะห์ควรวัดความแตกต่างของอุณหภูมิของเตาเผาและอุณหภูมิของตัวอย่างก่อน

5.3.2 ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง คาลอริเมตรีแบบชดเชยกำลัง (power compensation DSC)

หลักการของเครื่อง DSC แบบชดเชยกำลังนั้น แตกต่างจากระบบ DTA โครงสร้างของเครื่อง DSC แบบชดเชยกำลังแสดงในภาพที่ 46



ภาพที่ 46 แผนผังของระบบ DSC แบบชดเชยกำลัง (Perkin Elmer crop.)

ที่มา : สุนันท์ สายกระสุน, การวิเคราะห์เชิงความร้อน, พิมพ์ครั้งที่ 2 (มหาสารคาม : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2553), 14.

จากรูปจะเห็นว่าฐานของส่วนประกอบที่ใช้ในการยึดตัวอย่างอยู่ที่บริเวณที่ใส่สารหล่อเย็น และมีการติดตั้งตัวรับรู้ความต้านทานบริเวณที่ใส่สารตัวอย่างและวัสดุอ้างอิง ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิของฐานที่ยึดตัวอย่างและเครื่องทำความร้อนได้ หากต้องการวัดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวอย่างและตัวอ้างอิงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสของตัวอย่าง สามารถทำได้โดยให้พลังงานจนกระทั่งความแตกต่างของอุณหภูมิมีน้อยกว่าค่าขีดเริ่ม (threshold value) ซึ่งโดยปกติจะมีค่าน้อยกว่า 0.01 K พลังงานที่ให้เข้าไปต่อหนึ่งหน่วยเวลาจะถูกบันทึกไว้ภายใต้ฟังก์ชันของอุณหภูมิหรือเวลา เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงความร้อนอย่างคร่าวๆ จะเห็นว่า พลังงานที่ให้เข้าไปจะเป็นสัดส่วนกับความจุความร้อนของตัวอย่าง ความไวสูงสุดของเครื่องมือนี้คือ 35 μW ช่วง

อุณหภูมิที่วัดได้อยู่ระหว่าง 110 และ 1000 K ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของส่วนประกอบของที่ยึดตัวอย่างที่เลือกใช้ ในบางครั้งอาจมีการออกแบบเครื่องให้สามารถวิเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 290 K เท่านั้น แต่เครื่องมือส่วนใหญ่มักจะถูกรออกแบบให้สามารถวิเคราะห์ได้ครอบคลุมช่วงของอุณหภูมิที่กล่าวมาข้างต้น การเทียบมาตรฐานอุณหภูมิและพลังงานสามารถทำได้โดยใช้วัสดุอ้างอิงมาตรฐาน เครื่องทำความร้อนของ DSC แบบชดเชยกำลัง มีขนาดเล็กกว่าที่ใช้ในเครื่อง DTA เจึงปริมาณ ดังนั้น การตอบสนองอุณหภูมิจะเร็วกว่าและสามารถใช้อัตราการสแกนที่สูงกว่า โดยปกติเครื่องมือนี้สามารถใช้อัตราสแกนจาก 0.3 จนถึง 320 K/s ไม่ว่าจะเป็นการให้ความร้อนหรือการให้ความเย็น แต่อัตราการสแกนที่เชื่อถือได้สูงสุดอยู่ที่ 60 K/min ในกรณีของการวิเคราะห์แบบอุณหภูมิกงที่ สามารถใช้เครื่องมือชนิดนี้ทำการอบอ่อนแบบขั้นเดียวหรือหลายขั้น และสามารถวัดความจุความร้อนได้ง่าย

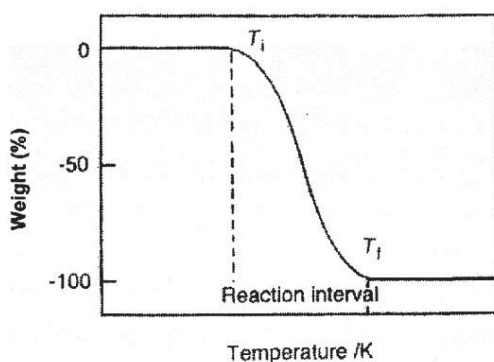
อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่เกิดจากการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงๆ หรือที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจึง ก็คือความสามารถในการรักษาความเป็นเส้นตรง (linearity) ของเส้นเชื่อมฐาน และต้องระวังหรือหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการควบแน่นบริเวณที่ยึดตัวอย่างเมื่อทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำๆ

5.4 การวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetry analysis, TGA)

การวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อนเป็นแขนงหนึ่งของการวิเคราะห์เชิงความร้อน โดยพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับความร้อนทุกอย่างไม่จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงมวลเสมอไป ยกตัวอย่างเช่น การหลอมเหลว การเกิดผลึกหรือการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว แต่มีหลายกระบวนการที่มวลเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น การดูดซับ การระเหิด การกลายเป็นไอ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน รีดักชันและการเสื่อมสภาพ เป็นต้น วิธี TGA นั้น โดยส่วนมากมักจะใช้ในการศึกษาการเสื่อมสภาพของสารและความเสถียรต่อความร้อนของวัสดุภายใต้เงื่อนไขต่างๆ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการศึกษาจลน์พลศาสตร์ของกระบวนการทางเคมี - กายภาพ ที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง การเปลี่ยนแปลงมวลสารของตัวอย่างนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆของเงื่อนไขการวิเคราะห์ เช่น มวล ปริมาตร ลักษณะทางกายภาพ รูปร่างของตัวอย่าง รวมทั้งธรรมชาติของที่ยึด

ตัวอย่าง นอกจากนี้ ธรรมชาติและความดันของบรรยากาศในบริเวณที่ใส่ตัวอย่าง (sample chamber) และอัตราการสแกนก็มีอิทธิพลที่สำคัญต่อกราฟ TGA ที่ได้ด้วย

ในการวิเคราะห์ TGA นั้น สิ่งแรกที่ต้องดำเนินการคือ จะต้องหาเงื่อนไขการวิเคราะห์ที่เหมาะสมให้ได้ก่อน เพื่อให้ได้ข้อมูล TGA ที่ถูกต้อง เงื่อนไขในการวิเคราะห์ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละตัวอย่าง ควรมีการทำมาตรฐานและสามารถนำไปใช้ได้ตลอดช่วงที่มีการวิเคราะห์ ซึ่งจะทำให้ผลของการวิเคราะห์ TGA ที่ได้สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ โดยปกติเส้นกราฟ TGA จะพล็อตอยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงมวล (Δm) ซึ่งอยู่ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ในแนวตั้ง กับอุณหภูมิ (T) หรือเวลา (t) ในแนวนอน ภาพที่ 47 แสดงตัวอย่างเส้นกราฟ TGA ที่มีกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเพียงขั้นเดียวเมื่อวิเคราะห์แบบสแกน ศึกษาและวิเคราะห์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดยพิจารณาจากอุณหภูมิเริ่มต้นที่มีการเสื่อมสภาพ (T_i) และอุณหภูมิสุดท้ายที่มีการเสื่อมสภาพ (T_f) โดย T_i เป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่มวลสารของตัวอย่างเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่ T_f เป็นอุณหภูมิสุดท้ายที่มวลสารมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งค่าของ T_i และ T_f ไม่มีนัยสำคัญอะไรมากเพียงแต่บอกให้ทราบถึงอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยา และช่วงของปฏิกิริยา ($T_i - T_f$) ซึ่งไม่สามารถให้ความหมายของค่าที่ได้ โดยค่าต่างๆเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์



ภาพที่ 47 ตัวอย่างเส้นกราฟ TGA ที่มีกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเพียงขั้นเดียว

ที่มา : สุนันท์ สายกระสุน, การวิเคราะห์เชิงความร้อน, พิมพ์ครั้งที่ 2 (มหาสารคาม : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2553), 48.

ในการแปลความหมายของข้อมูลที่ได้จาก TGA นั้นมักจะนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคอื่นๆ มีผู้ผลิตเครื่อง TA หลายบริษัท ที่มักจะเสนอขายเครื่องมือ

วิเคราะห์ TGA – DTA แบบพร้อมกัน ซึ่งข้อดีของเครื่องที่สามารถวิเคราะห์ได้พร้อมกันก็คือ ตัวอย่างและเงื่อนไขของการทดลองจะเหมือนกัน ซึ่งทำให้สามารถเปรียบเทียบข้อมูลได้โดยตรง และสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม สมรรถนะของเครื่องไม่ว่าจะวิเคราะห์พร้อมกันหรือไม่พร้อมกัน ควรจะอยู่ในระดับที่เป็นที่ยอมรับในเรื่องของความถูกต้องของข้อมูลและควรมีการออกแบบให้ได้มาตรฐาน

ในระหว่างที่วิเคราะห์ TGA นั้น จะมีผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเกิดขึ้น ซึ่งแก๊สที่เกิดขึ้นสามารถให้ข้อมูลและรายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นและสามารถวิเคราะห์แก๊สได้ หากนำเครื่องมือวิเคราะห์แก๊สมาเชื่อมต่อเข้ากับเครื่อง TGA การวิเคราะห์เชิงความร้อนและการวิเคราะห์แก๊สที่เกี่ยวข้องนี้เรียกว่า วิเคราะห์แก๊สที่เกี่ยวข้อง (evolved gas analysis, EGA) เครื่องมือต่างๆ ที่มักนำมาต่อเชื่อมกับเครื่อง TGA ได้แก่ แมสสเปกโตรมิเตอร์ (TGA - MS) ฟลูอิดสโครป อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (TGA - FTIR) และแก๊สโครมาโตกราฟี (TGA - GC) เป็นต้น (แม้ อมรสิทธิ์ และคณะ 2553 : ; สุนันท์ สายกระสุน 2553 :)

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยต่างประเทศ

Pawluk-Kolc, M., J. Zieba-Palus, and A. Parczewski, 2008 ทำการศึกษาผลของการหลอมใหม่ต่อการกระจายของดัชนีหักเห ในการแยกประเภทของตัวอย่างแก้ว ที่เป็นกระจกรยนต์ และกระจกหน้าต่าง โดยเฉพาะแก้วทั้งสองชนิดมีค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยของแก้วที่ผ่านการหลอมใหม่ สูงกว่าค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยของแก้วก่อนหลอม ในขณะที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของดัชนีหักเหมีค่าน้อยลง นั่นคือการหลอมเศษแก้วทำให้มีความสม่ำเสมอของดัชนีหักเหเพิ่มขึ้น การจำแนกความแตกต่างเศษแก้วใช้ค่า ΔRI (ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของดัชนีหักเหหลังจากหลอมและก่อนหลอม) ซึ่งผลที่ได้คือ ΔRI ไม่ใช่ตัวแปรที่ดีในการนำไปใช้จำแนกความแตกต่างระหว่างกระจกถึงนิรภัยทั้งสองชนิด

Suzuki et al., 2000 ศึกษาการวัดดัชนีหักเหและการวิเคราะห์ธาตุโดย ICP-MS เพื่อนำมาใช้ในการจำแนกตัวอย่างขวดแก้วทางนิติวิทยาศาสตร์ที่มาจากแหล่งกำเนิดต่างกัน ค่าดัชนีหักเหคำนวณจากอุณหภูมิที่เหมาะสมเมื่อมองไม่เห็นเศษแก้วในน้ำมันซิลิโคน ความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหถูกคำนวณจากทั้งหมด 120 คู่ของ 16 ตัวอย่าง ผลที่ได้คือ 107 คู่ สามารถแบ่งแยกได้ ขณะที่ 13 คู่ไม่สามารถแบ่งแยกได้ ส่วนการวิเคราะห์โดย ICP-MS จะวิเคราะห์ธาตุ 13 ธาตุในเศษแก้ว คือ Co, Cu, Zn, Rb, Sr, Zr, Ag, Sn, Sb, Ba, La, Ce และ Pb โดย NIST SRM 612 กำหนดว่าค่า RSD ควรจะน้อยกว่า 3.2% ยกเว้น Sn และ Pb อย่างไรก็ตามตัวอย่างแก้วทั้งหมด 13 คู่ที่ไม่สามารถแบ่งแยกได้ด้วยการเปรียบเทียบดัชนีหักเห สามารถแบ่งแยกโดยวิธีการนี้ นั่นคือ การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุรวมกับการวัดดัชนีหักเหช่วยปรับปรุงความสามารถในการจำแนกตัวอย่างขวดแก้วได้

Causin et al., 2009 ได้ศึกษาการจำแนกความแตกต่างของถุงมือยางในทางนิติวิทยาศาสตร์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โดย thermogravimetry และ differential scanning calorimetry โดยศึกษาความแตกต่างของผลการวิเคราะห์ที่ได้จากถุงมือยางที่ได้จากกระบวนการผลิต และวัตถุดิบที่นำมาผลิตถุงมือยาง ผลการศึกษาพบว่า มีความเป็นไปได้ถึง 99.5% ในการจำแนกถุงมือยาง ซึ่งการทดสอบพื้นฐาน เช่น การทดสอบด้วยตาเปล่า หรือการวัดความหนา ไม่สามารถนำมาจำแนกชนิดของถุงมือยางได้ เนื่องจากตัวอย่างทั้งหมดไม่สามารถแบ่งแยกความแตกต่างได้ด้วยวิธีการเหล่านี้

Sajwan et al., 2007 ศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของท่อ high density polyethylene (HDPE) 28 ตัวอย่าง ที่ผลิตและจำหน่ายโดยบริษัทผู้ผลิตในประเทศอินเดีย 13 บริษัท ด้วยเทคนิค differential scanning calorimetry (DSC) เพื่อเป็นฐานข้อมูล ว่าการทดสอบด้วยเทคนิค DSC นี้สามารถใช้จำแนกความแตกต่างของตัวอย่างท่อ HDPE ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกันแต่มีการผลิตโดยบริษัทผู้ผลิตแตกต่างกันได้ จากผลการศึกษาแสดงว่าอุณหภูมิของการหลอมอาจใช้เป็นบรรทัดฐานในการแบ่งแยกท่อ HDPE ในกรณีที่ท่อตัวอย่างมีแหล่งที่มาต่างกัน

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1.1 แก้วใสชนิดต่างๆจำนวน 11 ชนิด

ตารางที่ 2 แสดงชนิดของแก้วและแหล่งที่มา

ลำดับที่	ชนิดแก้ว	แหล่งที่มา
1	กระจกหน้ารถยนต์	ร้านเอส เอส กระจกรถยนต์
2	กระจกประตูรถยนต์	ร้านเอส เอส กระจกรถยนต์
3	กระจกหน้าต่างใส	ร้านขายของเก่า
4	กระจกแผ่นเรียบใส	ร้านมิตรเจริญ
5	บีกเกอร์แก้วใส	ห้องปฏิบัติการ มหาวิทยาลัยศิลปากร
6	แก้วน้ำใส	ร้านขายของเก่า
7	ขวดน้ำอัดลมใส	ร้านขายของเก่า
8	ขวดเหล้าใส	ร้านขายของเก่า
9	ขวดแก้วใส	ร้านขายของเก่า
10	จานแก้วใส	บริษัท โอเชียนกลาส จำกัดมหาชน
11	ชามแก้วใส	ห้างหุ้นส่วนจำกัด ชาญุฑวิชัย



(a)

(b)

(c)

(d)



(e)

(f)

(g)

(h)



(i)

(j)

(k)

ภาพที่ 48 แก้วใส 11 ชนิดที่ใช้ในการวิจัย คือ (a) กระจกหน้ารถยนต์ (b) กระจกประตูรถยนต์ (c) กระจกหน้าต่างใส (d) กระจกแผ่นเรียบใส (e) บีกเกอร์แก้วใส (f) แก้วน้ำใส (g) ขวดน้ำอัดลมใส (h) ขวดเหล้าใส (i) ขวดแก้วใส (j) จานแก้วใส และ (k) ชามแก้วใส

1.2 ชิ้นส่วนพลาสติกที่นำมาจากส่วนต่างๆของรถยนต์

ตารางที่ 3 แสดงชนิดของพลาสติกและแหล่งที่มาของบริษัทผู้ผลิต

ลำดับที่	ชนิดพลาสติก	แหล่งที่มาของบริษัทผู้ผลิต
1	ชุดแต่งด้านข้างรถ (skirt)	A
2	กันชนหน้ารถ	A, B

ตารางที่ 3 แสดงชนิดของพลาสติกและแหล่งที่มา (ต่อ)

ลำดับที่	ชนิดพลาสติก	แหล่งที่มาของบริษัทผู้ผลิต
3	กรอบทะเบียนรถ	A, B
4	โคมไฟหน้า	A, B
5	พลาสติกของกระจกมองข้าง	A, B
6	เลนส์ไฟเลี้ยว	A, B
7	กรอบพลาสติกของไฟนํ้ารถ	A, B
8	แขนยึดกระจกมองข้าง	A
9	เลนส์ไฟนํ้ารถ	A, B
10	กันชนหลังรถ	A



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

ภาพที่ 49 พลาสติกจากส่วนประกอบต่างๆของรถยนต์ A ที่ใช้ในการวิจัย (a) ชุดแต่งด้านข้างรถ (b) กันชนหน้ารถ (c) กรอบทะเบียนรถ (d) โคมไฟหน้า (e) พลาสติกของกระจกมองข้าง (f) เลนส์ไฟเลี้ยว (g) กรอบพลาสติกของไฟนํ้ารถ (h) แขนยึดกระจกมองข้าง และ (i) เลนส์ไฟนํ้ารถ

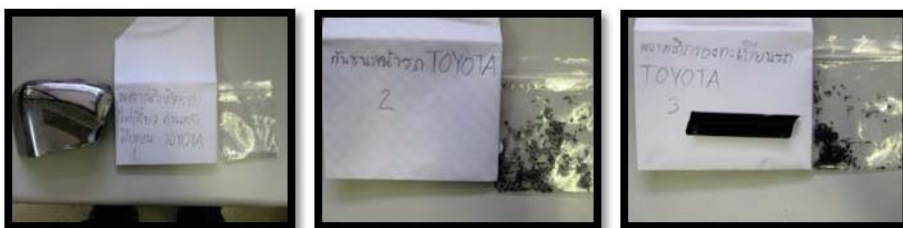


(g)

(h)

(i)

ภาพที่ 49 พลาสติกจากส่วนประกอบต่างๆของรถยนต์ A ที่ใช้ในการวิจัย (a) ชุดแต่งด้านข้างรถ (b) กันชนหน้ารถ (c) กรอบตะเบียนรถ (d) โคมไฟหน้า (e) พลาสติกของกระจกมองข้าง (f) เลนส์ไฟเลี้ยว (g) กรอบพลาสติกของไฟหน้ารถ (h) แขนยึดกระจกมองข้าง และ (i) เลนส์ไฟหน้ารถ (ต่อ)



(a)

(b)

(c)

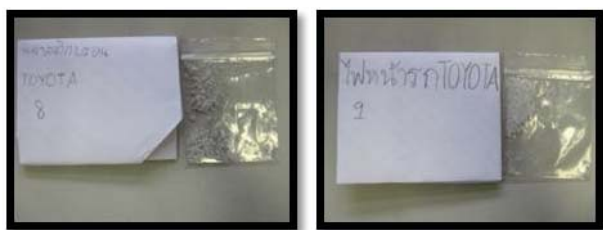


(d)

(e)

(f)

ภาพที่ 50 พลาสติกจากส่วนประกอบต่างๆของรถยนต์ B ที่ใช้ในการวิจัย (a) กันชนหลังรถ (b) กันชนหน้ารถ (c) กรอบตะเบียนรถ (d) พลาสติกของกระจกมองข้าง (e) เลนส์ไฟเลี้ยว (f) กรอบพลาสติกของไฟหน้ารถ (g) โคมไฟหน้า และ (h) เลนส์ไฟหน้ารถ



(g)

(h)

ภาพที่ 50 พลาสติกจากส่วนประกอบต่างๆของรถยนต์ B ที่ใช้ในการวิจัย (a) กันชนหลังรถ (b) กันชนหน้ารถ (c) กรอบตะเบียนรถ (d) พลาสติกของกระจกมองข้าง (e) เสนสไฟ เลี้ยว (f) กรอบพลาสติกของไฟหน้ารถ (g) โคมไฟหน้า และ(h) เสนสไฟหน้ารถ (ต่อ)

1.3 ครอบอกตวงขนาด 10 ml

1.4 ไมโครปิเปตขนาด 50-1000 μ l

2. สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

ตารางที่ 4 แสดงสารเคมี 9 ชนิดและแหล่งที่มา

ลำดับที่	ชนิดสารเคมี	แหล่งที่มา
1	Dichloromethane	Merck
2	Cyclohexanol	Fluka
3	Ethyl Benzoate	BDH Chemicals
4	Pyridine	Fluka
5	Methyl Benzoate	Fluka
6	Anisole	Fluka
7	Methyl Salicylate	บริษัท สงฮวด จำกัด
8	Benzyl Alcohol	May and Baker
9	m-cresol	SAFC

3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1 ชุดเครื่องมือ TGA รุ่น Pyris 1 TGA ผลิตโดย Perkin Elmer Instruments

3.2 ชุดเครื่องมือ DSC รุ่น Pyris Diamond DSC ผลิตโดย Perkin Elmer Instruments

3.3 ชุดเครื่องมือ DSC รุ่น 910 DSC ผลิตโดย Du Pont Instruments

3.4 เครื่อง Refractometer ผลิตโดย CARL ZEISS

3.5 ชุดหลอดไฟโซเดียม D line ความยาวคลื่น 589 nm

3.6 กล้องจุลทรรศน์ Olympus



(a)



(b)

ภาพที่ 51 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย (a) ชุดเครื่องมือ TGA (b) ชุดเครื่องมือ Pyris Diamond DSC

(c) ชุดเครื่องมือ 910 DSC (d) เครื่อง Refractometer (e) ชุดหลอดไฟโซเดียม

(f) กล้องจุลทรรศน์



(c)



(d)



(e)



(f)

ภาพที่ 51 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย (a) ชุดเครื่องมือ TGA (b) ชุดเครื่องมือ Pyris Diamond DSC

(c) ชุดเครื่องมือ 910 DSC (d) เครื่อง Refractometer (e) ชุดหลอดไฟโซเดียม

(f) กล้องจุลทรรศน์ (ต่อ)

วิธีการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่างแก้วและพลาสติก

1.1 วิธีการเตรียมตัวอย่างแก้ว

1.1.1 นำแก้วมาล้างน้ำให้สะอาด แล้วปล่อยให้แห้ง

1.1.2 ทำเศษแก้วให้มีขนาด 2-5 mm โดยการห่อแก้วด้วยกระดาษ

หนังสือพิมพ์แล้วใช้ฆ้อนทุบ

1.1.3 นำเศษแก้วใส่ภาชนะปิด แล้วเขียนกำกับว่าเป็นเศษแก้วชนิดใด

1.1.4 ทำเช่นเดียวกันนี้ในขั้นตอนที่ 1.1.1-1.1.3 กับแก้วที่เหลือทั้งหมด

1.2 วิธีการเตรียมตัวอย่างพลาสติก

1.2.1 นำชิ้นส่วนพลาสติกมาล้างน้ำให้สะอาดแล้วปล่อยให้แห้ง

1.2.2 หั่นเป็นชิ้นเล็กๆให้มีขนาดประมาณ 2-5 mm

1.2.3 ใส่เศษพลาสติกในภาชนะปิดแล้วเขียนกำกับว่าเป็นพลาสติกชนิด

ใด

1.2.4 ทำเช่นเดียวกันนี้ในขั้นตอนที่ 1.2.1-1.2.3 กับพลาสติกที่เหลือ

ทั้งหมด

2. การหาความหนาแน่นของเศษแก้ว

2.1 เลือกเศษแก้วที่มีขนาดประมาณ 1 cm ล้างด้วยน้ำเปล่าแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง

2.2 นำเศษแก้วมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้า แล้วบันทึกค่าที่ได้

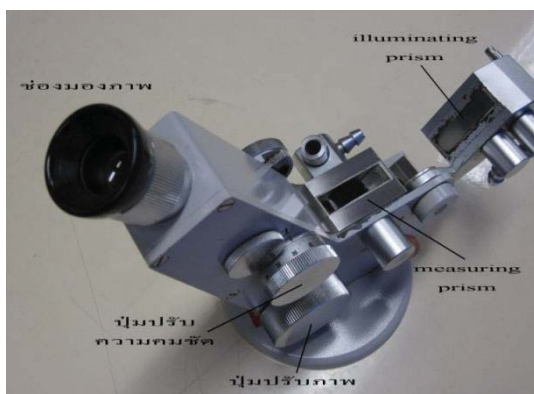
2.3 เติมน้ำลงในกระบอกตวงให้ได้ปริมาณ 5 ml

2.4 ใส่เศษแก้วลงในกระบอกตวง แล้วบันทึกค่าปริมาตรน้ำที่เพิ่มขึ้น

2.5 ทำเช่นเดียวกันนี้ตั้งแต่ข้อ 1-4 กับเศษแก้วทุกชนิด ทั้งหมด 66 ตัวอย่าง

3. การหาดัชนีหักเหของสารเคมี

3.1 เปิด illuminating prism ทำความสะอาด measuring prism ด้วยอะซิโตน



ภาพที่ 52 ตำแหน่งต่างๆของ Refractometer

3.2 มองผ่านช่องมองภาพของ Refractometer ปรับ Reflection borderline หรือเส้นแบ่งระหว่างแถบสว่างกับแถบมืดให้อยู่ตรงกลางโดยการหมุนปุ่มปรับภาพ แล้วปรับให้ภาพมีความคมชัดที่สุดโดยการหมุนปุ่มปรับความคมชัดของภาพ และแผ่นสะท้อนแสง

3.3 หยดสารเคมีที่ต้องการหาค่าดัชนีหักเหลงบน measuring prism 2-4 หยดแล้วปิด illuminating prism

3.4 สังเกตระดับแถบสว่างแถบมืดและความคมชัดของภาพให้ตรงตามข้อ 3.2 บันทึกค่าดัชนีหักเหที่อ่านได้จากแถบสเกลด้านล่าง

3.5 ทำความสะอาด measuring prism และ illuminating prism

3.6 ทำเช่นเดียวกันนี้ตั้งแต่ข้อ 3.3-3.5 จนกระทั่งครบสารเคมีทุกตัว

4. การหาค่าดัชนีหักเหของเศษแก้ว

4.1 จัดวางหลอดไฟโซเดียมให้อยู่ในตำแหน่งที่แสงส่องผ่าน ไดอะแฟรมไปยังเลนส์ใกล้วัตถุตั้งรูปภาพด้านล่าง



ภาพที่ 53 การจัดวางตำแหน่งของหลอดไฟโซเดียม

4.2 นำเศษแก้วล้างด้วยอะซิโตนและปล่อยให้แห้ง

4.3 วางเศษแก้วบนกระจกสไลด์ หยดสารเคมีให้ท่วมเศษแก้ว

4.4 นำกระจกสไลด์วางบนแท่นของกล้องจุลทรรศน์ แล้วปรับแท่นของกล้องจุลทรรศน์ให้อยู่ใกล้กับเลนส์ใกล้วัตถุ โดยใช้เลนส์ใกล้วัตถุที่กำลังขยาย 10 เท่า

4.5 สังเกต Becke line โดยดูที่เส้นสว่างบริเวณขอบของเศษแก้ว ว่าเลื่อนเข้าหาเศษแก้วหรือออกจากเศษแก้ว ด้วยการปรับให้ระยะระหว่างแท่นของกล้องจุลทรรศน์กับเลนส์ใกล้วัตถุเพิ่มขึ้น

4.6 บันทึกผลที่ได้ ถ้ามองไม่เห็น Becke line แสดงว่าเศษแก้วมีดัชนีหักเหเท่ากับสารเคมี ถ้า Becke line เลื่อนออกจากเศษแก้วแสดงว่าเศษแก้วมีดัชนีหักเหน้อยกว่าสารเคมี แต่ถ้า Becke line เลื่อนเข้าภายในเศษแก้วแสดงว่าเศษแก้วมีดัชนีหักเหมากกว่าสารเคมี

4.7 ทำความสะอาดกระจกสไลด์และเศษแก้ว

4.8 ทำเช่นเดียวกันนี้ตั้งแต่ข้อ 4.2-4.7 จนครบเศษแก้วทุกชนิด

5. การวิเคราะห์เศษชิ้นส่วนพลาสติกด้วยเครื่อง DSC

5.1 นำ pan เปล่าและcover มาชั่งด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้า แล้วกดเซ็ทให้เป็นศูนย์

5.2 บรรจุเศษพลาสติกลงใน pan แล้วนำไปชั่งโดยต้องชั่ง cover ด้วย ให้มีน้ำหนักประมาณ 10-15 mg

5.3 บันทึกน้ำหนักที่อ่านได้แล้วนำไปอัด หลังจากอัดให้นำมาชั่งอีกครั้ง

5.4 บันทึกค่าที่ได้ จากนั้นใส่ pan ลงในเซลล์โดยอีกเซลล์ให้ใส่ pan เปล่า แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดยเครื่องรุ่น Pyris Diamond DSC ให้ตั้งเครื่องตามตารางที่ 5 ส่วนเครื่อง 910 DSC ให้ตั้งสภาวะของเครื่องตามตารางที่ 6

ตารางที่ 5 การตั้งเครื่อง Pyris Diamond DSC

หัวข้อ	รายละเอียด
อุณหภูมิเริ่มต้น	50.00 °C คงไว้ 0.5 min
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	10.00 °C /min
อุณหภูมิสุดท้าย	480.00 °C คงไว้ 0.5 min
อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน	20 ml/min

ตารางที่ 6 การตั้งสภาวะของเครื่อง 910 DSC

หัวข้อ	รายละเอียด
อุณหภูมิเริ่มต้น	50.00 °C
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	10.00 °C /min
อุณหภูมิสุดท้าย	600.00 °C
อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน	10 ml/min

5.5 นำ pan ทั้งสองออกจากเซลล์ รอให้อุณหภูมิลดลงแล้วทำความสะอาดเซลล์

5.6 ทำเช่นเดียวกันนี้ตั้งแต่ข้อ 5.1-5.5 จนครบตามตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์

6. การวิเคราะห์เศษชิ้นส่วนพลาสติกด้วยเครื่อง TGA

6.1 ชั่ง crucible เปลาด้วยเครื่อง TGA

6.2 นำ crucible เปลามาชั่งด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้า แล้วกดเซ็ทให้เป็นศูนย์

6.3 บรรจุเศษพลาสติกลงใน crucible แล้วนำไปชั่งให้ได้น้ำหนักประมาณ 10 mg

6.4 นำ crucible มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA โดยตั้งเครื่อง TGA ดังนี้

ตารางที่ 7 การตั้งเครื่อง TGA

หัวข้อ	รายละเอียด
อุณหภูมิเริ่มต้น	35.00 °C คงไว้ 1.0 min
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	10.00 °C /min
อุณหภูมิสุดท้าย	800.00 °C
อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน	20 ml/min

6.5 นำ crucible ออก รอให้อุณหภูมิลดลง

6.6 ทำตามข้อ 6.1-6.5 จนครบตามตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์

บทที่ 4

ผลการวิจัย

1. การหาความหนาแน่นของเศษแก้ว

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการหาความหนาแน่นของเศษแก้ว 11 ชนิด ชนิดละ 6 ตัวอย่าง ซึ่งการหาความหนาแน่นของเศษแก้วสามารถหาได้จาก การนำน้ำหนักของเศษแก้วหารด้วย ปริมาตรของเศษแก้ว โดยปริมาตรของเศษแก้วได้มาจากการนำปริมาตรน้ำที่เพิ่มขึ้นลบกับปริมาตร น้ำที่มีอยู่เดิม ผลการคำนวณหาความหนาแน่นเฉลี่ยของเศษแก้วแสดงในตารางที่ 8 ส่วนการชั่ง น้ำหนักและการวัดปริมาตรของเศษแก้ว 11 ชนิด สามารถดูจากภาคผนวก ก

ตารางที่ 8 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของเศษแก้วตัวอย่าง 11 ชนิด (g/cm^3)

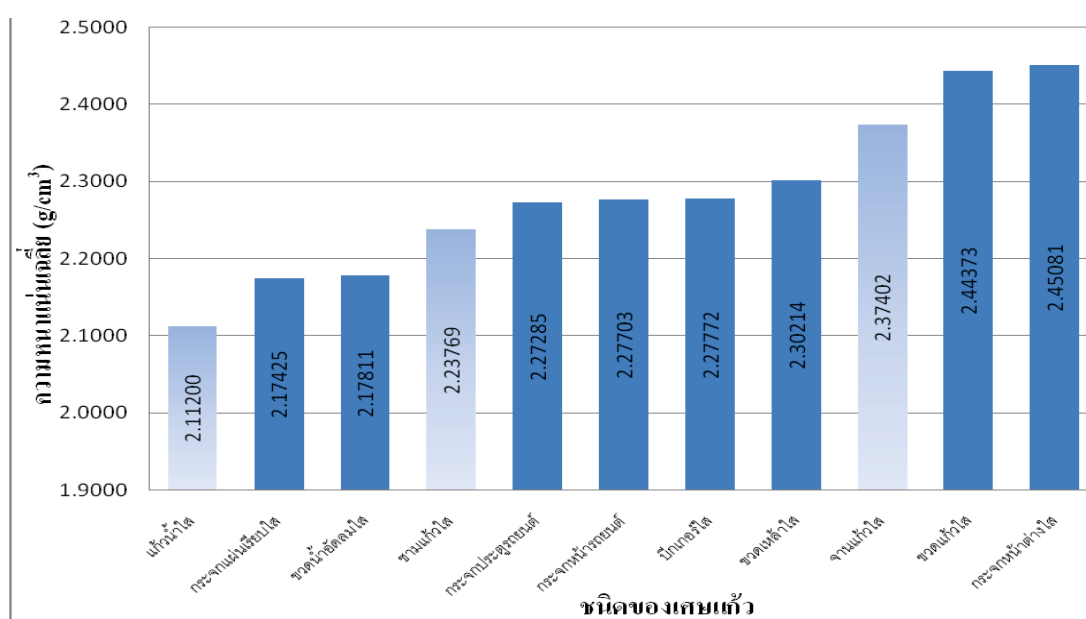
ตัวอย่างเศษแก้ว	mean	SD
แก้วน้ำใส	1.932	0.182
กระจกแผ่นเรียบใส	2.174	0.189
ขวดน้ำอัดลมใส	2.178	0.336
ชามแก้วใส	2.238	0.084
กระจกประตูลอยนํ้า	2.273	0.285
กระจกหน้าต่างลอยนํ้า	2.277	0.326
ปีกเกอร์ใส	2.278	0.191
ขวดเหล้าใส	2.302	0.321
จานแก้วใส	2.374	0.261

ตารางที่ 8 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของเศษแก้วตัวอย่าง 11 ชนิด (g/cm^3) (ต่อ)

ตัวอย่างเศษแก้ว	mean	SD
ขวดแก้วใส	2.444	0.200
กระจกหน้าต่างใส	2.451	0.130

โดยที่ SD เป็นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

พิจารณาตารางที่ 8 พบว่า แก้วน้ำใสมีความหนาแน่นเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 1.932 g/cm^3 ส่วนกระจกหน้าต่างใสมีความหนาแน่นเฉลี่ยมากที่สุด คือ 2.451 g/cm^3 นอกจากนี้ยังพบว่า มีเศษแก้วที่มีความหนาแน่นเฉลี่ยใกล้เคียงกันดังนี้ คือ กระจกแผ่นเรียบใสและขวดน้ำอัดลม มีความหนาแน่นเฉลี่ยเป็น 2.17 และ 2.18 g/cm^3 ตามลำดับ ส่วนเศษแก้วของ กระจกประตูรถยนต์ กระจกหน้ารถยนต์ ปีกเกอร์ใสและขวดเหล้าใส มีความหนาแน่นเฉลี่ยตามลำดับดังนี้ $2.27, 2.28, 2.28$ และ 2.30 g/cm^3 และสุดท้ายได้แก่ ขวดแก้วใสและกระจกหน้าต่างใส มีความหนาแน่นเฉลี่ยเป็น 2.44 และ 2.45 g/cm^3 ตามลำดับ เมื่อนำค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของเศษแก้ว 11 ชนิด จากตารางที่ 8 มาแสดงเป็นแผนภูมิแท่งจะมีรูปแบบดังแผนภูมิที่ 1



แผนภูมิที่ 1 แผนภูมิความหนาแน่นเฉลี่ยของเศษแก้ว 11 ชนิด

จากแผนภูมิที่ 1 พบว่า แก้วน้ำใส ชามแก้วใสและจานแก้วใส มีความหนาแน่นเฉลี่ยที่คำนวณได้แตกต่างจากเศษแก้วชนิดอื่น ส่วนเศษแก้วที่เหลือมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยแตกต่างกันน้อยมาก ถึงแม้จะเป็นเศษแก้วต่างชนิดกัน

2. การหาค่าดัชนีหักเหของเศษแก้ว

การหาค่าดัชนีหักเหของเศษแก้ว กระทำโดยการเปรียบเทียบเศษแก้วกับสารเคมีที่ทราบค่าดัชนีหักเห แล้วสังเกตเส้น Becke line ด้วยการปรับให้ระยะระหว่างเลนส์ใกล้วัตถุกับแท่งวางสไลด์เพิ่มขึ้น ถ้ามองไม่เห็นเส้น Becke line แสดงว่าเศษแก้วมีดัชนีหักเหเท่ากับสารเคมี แต่ถ้ามองเห็นเส้น Becke line เคลื่อนเข้าหาตัวกลางใด (เศษแก้วหรือสารเคมี) แสดงว่าตัวกลางนั้นมีดัชนีหักเหสูงกว่าอีกตัวกลางหนึ่ง จึงควรเปลี่ยนสารเคมีที่มีดัชนีหักเหสอดคล้องกับเศษแก้ว การหาค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยของเศษแก้ว 11 ชนิด ชนิดละ 6 ตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 9 ส่วนผลการวัดดัชนีหักเหของสารเคมีดูได้จากภาคผนวก ข และผลการศึกษา Becke line เพื่อหาค่าดัชนีหักเหของเศษแก้วดูได้จากภาคผนวก ค

ตารางที่ 9 ค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยของเศษแก้วตัวอย่าง 11 ชนิด

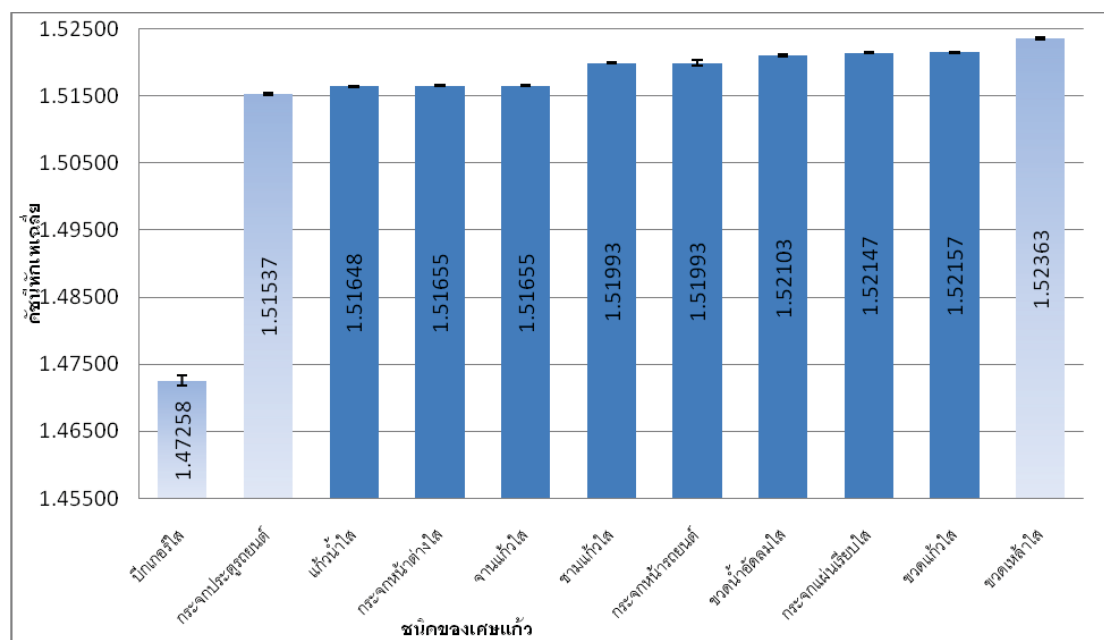
ลำดับที่	ชนิดของเศษแก้ว	ค่าเฉลี่ยช่วงดัชนีหักเห	Mean	SD ($\times 10^{-4}$)
1	บีกเกอร์ใส	1.4723 - 1.4729	1.47258	7.620
2	กระจกประจูดรถยนต์	1.5154 - 1.5156	1.51537	1.633
3	แก้วน้ำใส	1.5165 - 1.5166	1.51648	0.983
4	กระจกหน้าต่างใส	1.5165 - 1.5166	1.51655	0.837
5	จานแก้วใส	1.5165 - 1.5166	1.51655	0.837
6	ชามแก้วใส	1.5199 - 1.5201	1.51993	0.816
7	กระจกหน้ารถยนต์	1.5199 - 1.5201	1.51993	4.274
8	ขวดน้ำอัดลมใส	1.5208 - 1.5210	1.52103	1.633
9	กระจกแผ่นเรียบใส	1.5213 - 1.5215	1.52147	0.816
10	ขวดแก้วใส	1.5215 - 1.5217	1.52157	1.033

ตารางที่ 9 ค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยของเศษแก้วตัวอย่าง 11 ชนิด (ต่อ)

ลำดับที่	ชนิดกระจก	ค่าเฉลี่ยช่วงดัชนีหักเห	Mean	SD ($\times 10^{-4}$)
11	ขวดเหล้าใส	1.5236 - 1.5238	1.52363	1.633

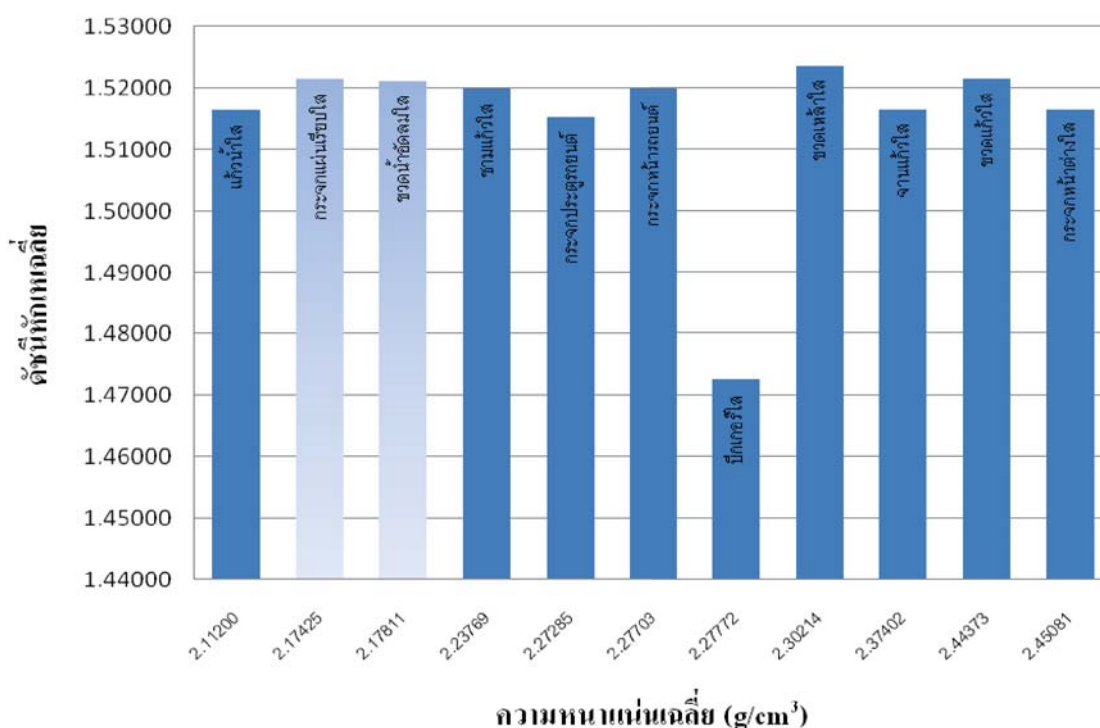
โดยที่ SD เป็นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากผลการศึกษาพบว่า เศษแก้วที่มีค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยใกล้เคียงกันมีดังนี้ คือ แก้วน้ำใส กระจกหน้าต่างใส และจานแก้วใส มีค่าดัชนีหักเหเฉลี่ย คือ 1.51648, 1.51655 และ 1.51655 ตามลำดับ ส่วนชามแก้วใสและกระจกหน้าต่างรถยนต์ มีค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยเท่ากันคือ 1.51993 และค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยของเศษแก้วจาก ขวดน้ำอัดลมใส กระจกแผ่นเรียบใส และขวดแก้วใส ได้แก่ 1.52103, 1.52147 และ 1.52157 ตามลำดับ นอกจากนี้จะเห็นว่า บีกเกอร์ใสมีค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ 1.47258 แต่มีความเบี่ยงเบนมาตรฐานมากที่สุดในกลุ่มของเศษแก้ว 11 ชนิด คือ 7.620×10^{-4} ซึ่งสามารถยอมรับได้ ส่วนขวดเหล้าใสมีค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยสูงที่สุด คือ 1.52363 หากนำค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยมาแสดงเป็นแผนภูมิแท่งจะได้ดังแผนภูมิที่ 2



แผนภูมิที่ 2 แผนภูมิต้นดัชนีหักเหเฉลี่ยของเศษแก้ว 11 ชนิด

จากแผนภูมิที่ 2 พบว่า บีกเกอร์ใส กระจกประตูลอยนตร์ และขวดเหล้าใส มีค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยแตกต่างจากเศษแก้วชนิดอื่น ส่วนเศษแก้วที่เหลือนอกจากนี้มีความแตกต่างของค่าดัชนีหักเห น้อยมาก หากนำเศษแก้วทั้ง 11 ชนิด มาแสดงเป็นแผนภูมิแท่งที่พล็อตระหว่างค่าความหนาแน่นเฉลี่ยและดัชนีหักเหเฉลี่ยจะได้แผนภูมิแท่งดังต่อไปนี้



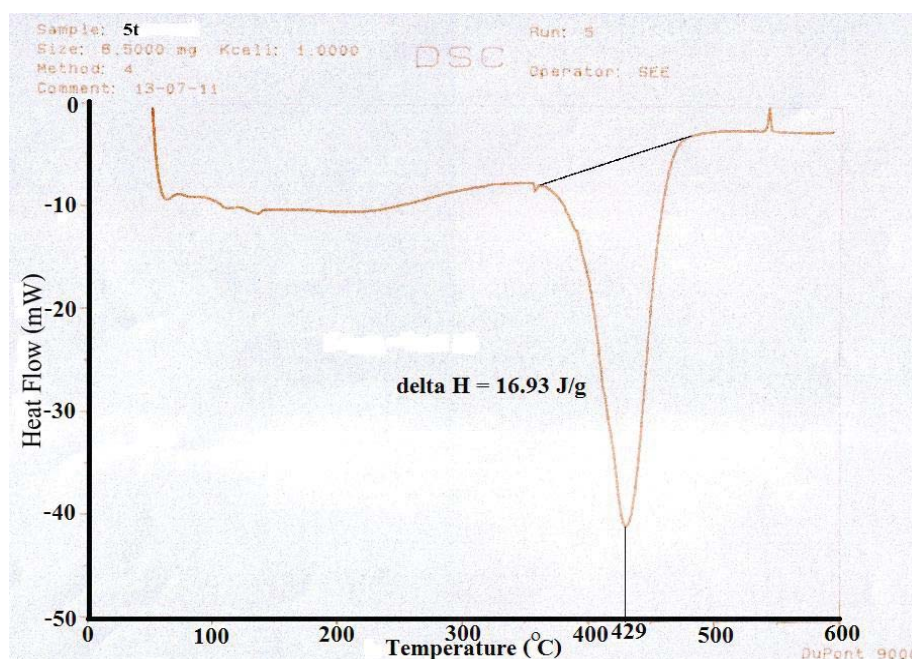
แผนภูมิที่ 3 แผนภูมิความหนาแน่นเฉลี่ยและดัชนีหักเหเฉลี่ยของเศษแก้ว 11 ชนิด

จากแผนภูมิข้างต้นจะสังเกตได้ว่า กระจกแผ่นเรียบใสและขวดน้ำอัดลมใส มีความหนาแน่นเฉลี่ย เป็น 2.174 g/cm³ และ 2.178 g/cm³ ตามลำดับ และมีค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยตามลำดับคือ 1.52147 และ 1.52103 ซึ่งแตกต่างกันน้อยมาก ส่วนเศษแก้วที่เหลือทั้งหมด 9 ชนิด มีความแตกต่างตามชนิดของเศษแก้วนั้นๆ นั่นคือ เศษแก้วบางชนิดแม้จะมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยใกล้เคียงกัน แต่ก็ยังมีค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยต่างกัน เช่น กระจกประตูลอยนตร์ กระจกหน้าต่างลอยนตร์และบีกเกอร์ใส มีความหนาแน่นเฉลี่ย คือ 2.273, 2.277 และ 2.278 g/cm³ ตามลำดับ แต่มีค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยตามลำดับเป็น 1.51537, 1.51993 และ 1.47258 เป็นต้น หรือเศษแก้วบางชนิดมีค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยใกล้เคียงกัน แต่ก็ยังมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยต่างกัน เช่น แก้วน้ำใส กระจกหน้าต่างใส และจานแก้วใส มีค่าดัชนีหักเห

เฉลี่ยเป็น 1.51648, 1.51655 และ 1.51655 ตามลำดับ แต่มีความหนาแน่นเฉลี่ยตามลำดับ คือ 1.932, 2.451 และ 2.374 g/cm³ เป็นต้น

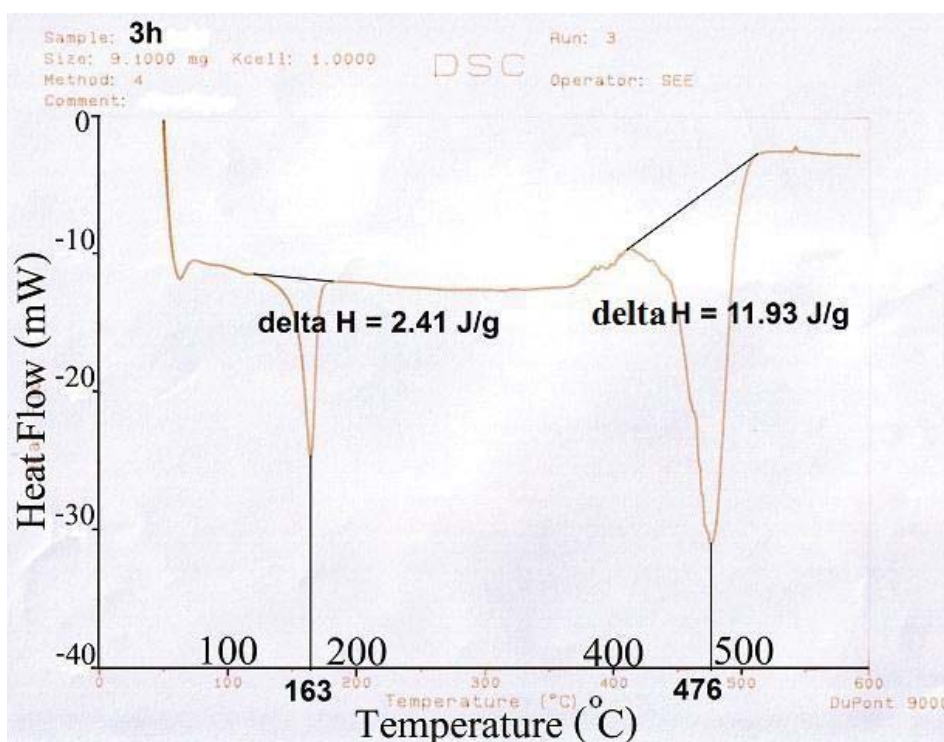
3. การศึกษาสมบัติทางความร้อนของเศษพลาสติก

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางความร้อนของชิ้นส่วนรถยนต์บางชนิดที่ทำจากพลาสติกด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) และ Thermogravimetric Analysis (TGA) โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ได้ผลการวิเคราะห์ในรูปแบบของเทอร์โมแกรม ดังภาพที่ 54 และ 55 ซึ่งเทอร์โมแกรมที่ได้พล็อตระหว่างการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ความร้อน (mW) กับอุณหภูมิ (°C) และสามารถบอกถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นว่ามี การดูดความร้อนหรือคายความร้อน ในการศึกษานี้เทอร์โมแกรมที่ได้จากตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ทั้งหมดเป็นเทอร์โมแกรมแบบดูดกลืนความร้อน (endothermic peak) การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างแต่ละชนิดรายงานโดยอุณหภูมิสูงสุดของการเปลี่ยนแปลง และการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี ΔH (J/g) ของการเกิด peak แบบดูดกลืนความร้อนของตัวอย่าง ดังตารางที่ 10



ภาพที่ 54 เทอร์โมแกรมของพลาสติกกระจกมองข้าง B ที่ได้จากเทคนิค DSC

พิจารณาภาพข้างต้นพบว่า เป็นเทอร์โมแกรมของพลาสติกกระจกมองข้าง B ที่ได้จากเทคนิค DSC ซึ่งเป็นเศษพลาสติกตัวอย่าง 5t มีการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อนเกิดขึ้น 1 peak มีอุณหภูมิของการเกิด peak อยู่ในช่วง 350 – 470°C โดยที่อุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสูงสุดมีค่า 429°C ส่วนปริมาณ ΔH มีค่าเป็น 16.93 J/g พลาสติกชนิดนี้จัดอยู่ในกลุ่มที่ 2 ตามตารางที่ 10 เนื่องจากมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสูงสุดใกล้เคียงกับพลาสติกตัวอย่างในกลุ่มนั้น

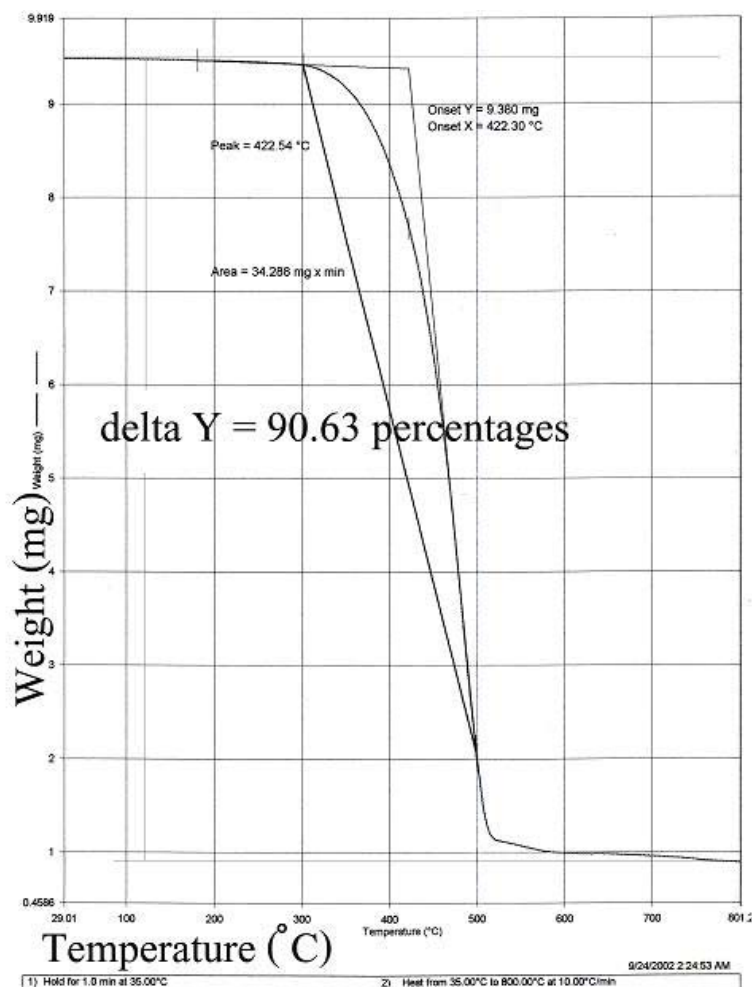


ภาพที่ 55 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์โดยเทคนิค DSC ของพลาสติกกรอบทะเบียนรถ A

จากภาพข้างต้นพบว่า เศษพลาสติกตัวอย่าง 3h ซึ่งก็คือกรอบทะเบียนรถ A ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค DSC มีเทอร์โมแกรมแสดงผลแบบดูดความร้อนเกิดขึ้น 2 peak โดย peak ที่ 1 มีอุณหภูมิอยู่ที่ 163°C มีค่า ΔH เป็น 2.41 J/g และอุณหภูมิของ peak ที่ 2 คือ 476°C ΔH มีค่าคือ 11.93 J/g โดยพลาสติกชนิดนี้เป็นโพลิเมอร์ชนิด Polypropylene (PP) ซึ่งมีอุณหภูมิของการหลอมเหลว (melting point) คือ 165-175°C ซึ่งพบว่าสอดคล้องกับอุณหภูมิ peak ที่ 1 ของเศษพลาสติกตัวอย่าง 3h ส่วนอุณหภูมิของ peak ที่ 2 คาดว่าเป็นอุณหภูมิของน้ำหนักที่หายไปของเศษ

พลาสติกตัวอย่าง ซึ่งพลาสติกเกิดการสลายตัวและเมื่อนำพลาสติกชนิดนี้มาทดสอบด้วยเทคนิค TGA พบว่าได้ผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 56

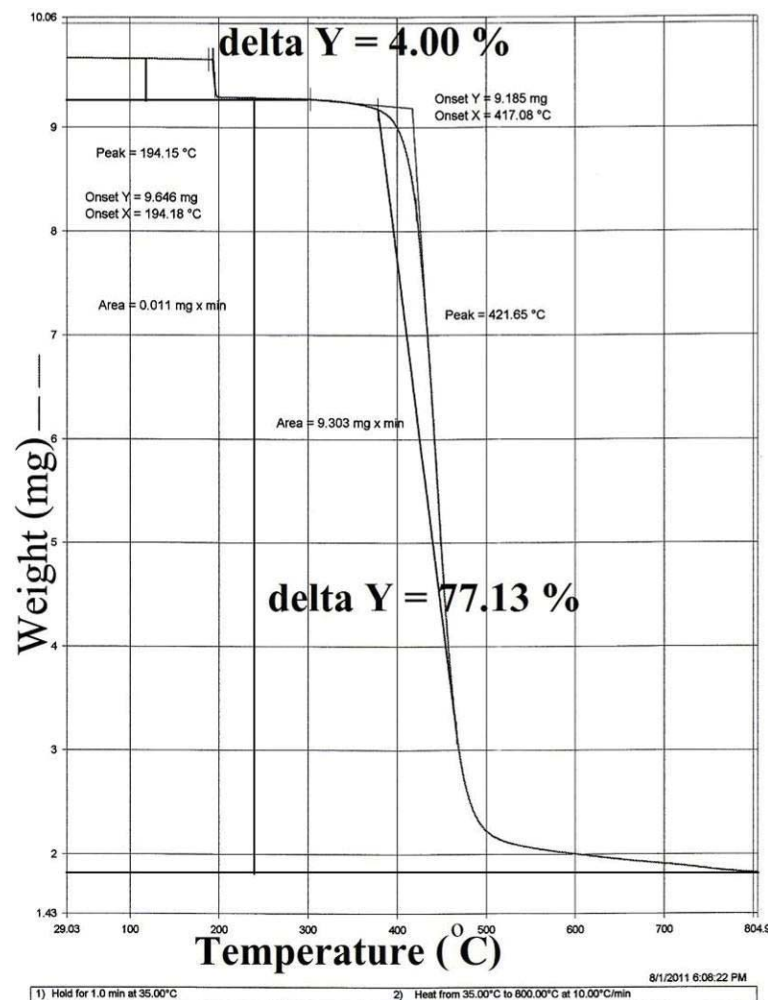
เทอร์โมแกรมของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA แสดงการเปลี่ยนแปลงมวลพล็อตระหว่างน้ำหนัก (mg) และอุณหภูมิ (°C) ในการศึกษานี้ได้ทำการวัดอุณหภูมิ Onset Temperature (°C) จากอุณหภูมิเริ่มต้นของเปลี่ยนแปลงมวล และวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวอย่างที่หายไป ส่วนในภาพที่ 56 เป็นเทอร์โมแกรมแสดงการวิเคราะห์กรอบทะเบียนรถ A ด้วยเทคนิค TGA ของพลาสติกตัวอย่าง 3h



ภาพที่ 56 เทอร์โมแกรมแสดงการวิเคราะห์กรอบทะเบียนรถ A ด้วยเทคนิค TGA ของพลาสติก

ตัวอย่าง 3h

จากภาพที่ 56 พบว่าเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค TGA ของเศษพลาสติกตัวอย่าง 3h ซึ่งนำมาจากกรอบทะเบียนรถ A มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก 1 ขั้นตอนโดยมีอุณหภูมิ onset เนื่องจากการเปลี่ยนน้ำหนักอยู่ที่ 422.30°C มีเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไป คือ 90.63% จากอุณหภูมิ onset ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก และเปอร์เซ็นต์ที่น้ำหนักตัวอย่างหายไปข้างต้นนี้ ทำให้ทราบว่าที่อุณหภูมิช่วง $300 - 600^{\circ}\text{C}$ เป็นช่วงอุณหภูมิของน้ำหนักที่หายไปของเศษพลาสติกตัวอย่าง โดยสังเกตได้ว่าเศษพลาสติกตัวอย่างมีน้ำหนักหายไปเกือบหมด



ภาพที่ 57 เทอร์โมแกรมแสดงการวิเคราะห์โคมไพเนนซ์ B โดยเทคนิค TGA จากพลาสติก

ตัวอย่าง 8t

จากภาพที่ 57 พบว่าเทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์โคมไฟหน้า B ด้วยเทคนิค TGA มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก 2 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนที่ 1 มีอุณหภูมิ onset จากการเปลี่ยนน้ำหนัก อยู่ที่ 194.18°C และมีเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไป คือ 4.00% ส่วนขั้นตอนที่ 2 ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก พบว่ามีอุณหภูมิ onset ที่ 417.08°C และมีเปอร์เซ็นต์ที่น้ำหนักตัวอย่างหายไป ถึง 77.13% ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักทั้ง 2 ขั้นตอนนี้ จะสังเกตได้ว่าอยู่ในช่วงของอุณหภูมิ $190 - 200^{\circ}\text{C}$ และ $350 - 800^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ ทำให้ทราบว่าในช่วงแรกเศษพลาสติกตัวอย่างมีน้ำหนักหายไปเล็กน้อย แต่ในช่วงหลังเศษพลาสติกตัวอย่างมีน้ำหนักหายไปเป็นจำนวนมากคงเหลืออยู่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อนำตัวอย่างทั้งหมด 17 ตัวอย่าง ซึ่งเป็นส่วนประกอบพลาสติกภายนอกรถยนต์มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC และ TGA ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์เศษพลาสติกตัวอย่างด้วยเทคนิค DSC และ TGA

Samples	DSC				TGA				
	การเปลี่ยนแปลงครั้งที่ 1		การเปลี่ยนแปลงครั้งที่ 2		การลดของน้ำหนักครั้งที่ 1		การลดของน้ำหนักครั้งที่ 2		
	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH (J/g)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH (J/g)	Onset Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	น้ำหนักที่หายไป (%)	Onset Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	น้ำหนักที่หายไป (%)	
กลุ่ม 1	2h	163	3.30	468	11.17	484.31	90.86	-	-
	2t	162	2.15	473	12.33	486.40	78.29	-	-
	3h	163	2.41	476	11.93	422.30	90.63	-	-
	7h	163	2.54	474	12.53	419.80	85.49	-	-
	7t	165	2.62	469	11.32	474.06	80.07	-	-
กลุ่ม 2	1h	435	16.66	-	-	444.51	99.49	-	-
	1t	433	19.48	-	-	436.53	99.16	-	-
	3t	428	18.75	-	-	427.46	99.87	-	-

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์เศษพลาสติกตัวอย่างด้วยเทคนิค DSC และ TGA (ต่อ)

Samples	DSC				TGA				
	การเปลี่ยนแปลงครั้งที่ 1		การเปลี่ยนแปลงครั้งที่ 2		การลดของน้ำหนักครั้งที่ 1		การลดของน้ำหนักครั้งที่ 2		
	Temp. (°C)	ΔH (J/g)	Temp. (°C)	ΔH (J/g)	Onset Temp. (°C)	น้ำหนักที่หายไป (%)	Onset Temp. (°C)	น้ำหนักที่หายไป (%)	
กลุ่ม 2	5h	432	17.78	-	-	440.92	96.19	-	-
	5t	429	16.93	-	-	434.13	97.08	-	-
กลุ่ม 3	4h	405	18.53	-	-	372.89	21.97	931.16	27.80
	6h	382	19.51	-	-	389.11	100.23	-	-
	6t	386	20.54	-	-	115.85	1.95	388.58	98.58
	8h	214	1.25	461	11.77	459.10	37.90	-	-
	8t	221	1.94	410	17.90	194.18	4.00	417.08	77.13
	9h	484	5.76	-	-	500.45	82.70	-	-
	9t	475	11.50	-	-	527.43	81.60	-	-

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์จากทั้งสองเทคนิคคือ DSC และ TGA สามารถจำแนกตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 10 ตามตารางนี้เศษพลาสติกตัวอย่าง 2h, 2t, 3h, 7h และ 7t มีเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC แสดงการเปลี่ยนแปลงแบบดูดกลืนพลังงาน 2 peak โดย peak ที่ 1 มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 162-165°C และมีค่า ΔH อยู่ในช่วง 2.15-3.30 J/g ส่วนช่วงของอุณหภูมิในการเกิด peak ที่ 2 คือ 468-476°C และปริมาณ ΔH มีค่า 11.17-12.53 J/g หากพิจารณาผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA พบว่าเทอร์โมแกรมที่ได้มีอุณหภูมิเนื่องจากการเปลี่ยนน้ำหนักของตัวอย่างเหล่านี้ในช่วง 419.80-486.40°C และมีเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่

หายไปอยู่ในช่วง 78.29-90.86% ซึ่งผลการวิเคราะห์เศษพลาสติกตัวอย่างทั้ง 5 ตัวอย่างนี้มีค่าใกล้เคียงกันจึงจัดไว้ในกลุ่มเดียวกันคือ กลุ่มที่ 1

ส่วนเทอร์โมแกรมของเศษพลาสติกตัวอย่าง 1h, 1t, 3t, 5h และ 5t มี peak ของการดูดกลืนพลังงาน 1 peak โดยอยู่ในช่วงของอุณหภูมิ 428-435°C ซึ่งมีค่า ΔH อยู่ในช่วง 16.66-19.48 J/g ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ต่อมาพิจารณาผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA พบว่าช่วงของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักคือ 427.46-444.51°C และมีช่วงเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวอย่างที่หายไปคือ 96.19-99.87% ทั้งอุณหภูมิของการเกิด peak, ค่า ΔH , อุณหภูมิเนื่องจากการเปลี่ยนน้ำหนักและเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปมีค่าใกล้เคียงกันจึงจัดเศษพลาสติกตัวอย่างเหล่านี้ไว้ในกลุ่มเดียวกันคือ กลุ่มที่ 2

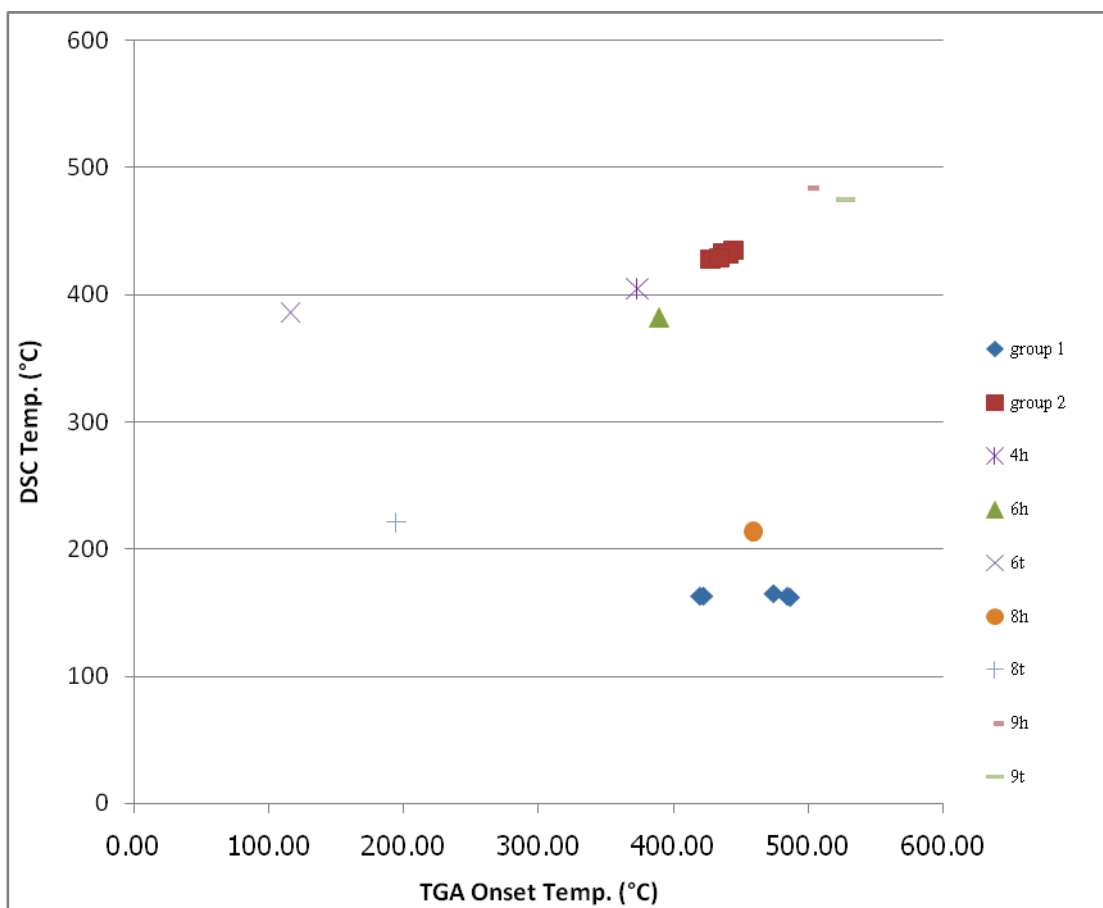
เศษพลาสติกตัวอย่างอื่นๆนอกจากนี้ มีค่าของการเปลี่ยนแปลงปริมาณทางความร้อนและการเปลี่ยนน้ำหนัก อันเนื่องมาจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC และ TGA แตกต่างกันซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่ต่างจากเศษพลาสติกตัวอย่างอื่นๆ จึงได้รวมอยู่ในกลุ่มที่ 3

เมื่อพิจารณาเศษพลาสติกตัวอย่างในกลุ่มที่ 1 พบว่าตัวอย่าง 2h และ 3h มีการระบุว่าเป็นโพลิเมอร์ชนิด Polypropylene (PP) มีอุณหภูมิการหลอมเหลวของ PP คือ 165-175°C¹ ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิ peak ที่ 1 ของเศษพลาสติกตัวอย่างในกลุ่มที่ 1 ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าเศษพลาสติกตัวอย่างในกลุ่มที่ 1 เป็นโพลิเมอร์ชนิด PP และจากการพิจารณาเศษพลาสติกตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ตามตารางที่ 10 คาดว่าเศษพลาสติกตัวอย่างในกลุ่มนี้เป็นโพลิเมอร์ชนิด Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA) เนื่องจากตัวอย่าง 5h มีการระบุชนิดของโพลิเมอร์ว่าเป็น ASA

ผลการวิเคราะห์เศษพลาสติกตัวอย่างโดยใช้เทคนิค DSC และ TGA จากตารางที่ 10 สามารถนำมาแสดงเป็นแผนภูมิแบบจุดของเศษพลาสติกตัวอย่างที่ plot ระหว่างอุณหภูมิ peak ที่ 1

¹ Prabodh C. Bolur, Properties of plastics [Online], accessed 29 December 2011.

ของเทอร์โมแกรมแบบจุดคลื่นความร้อนจากการวิเคราะห์ทางเทคนิค DSC และอุณหภูมิ onset ของการเปลี่ยนแปลงมวลครั้งที่ 1 จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA แสดงได้ดังแผนภูมิที่ 4



แผนภูมิที่ 4 การพล็อตระหว่างอุณหภูมิของพลาสติกตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทาง

ความร้อนครั้งที่ 1 จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC และ TGA

เมื่อพิจารณาแผนภูมิที่ 4 พบว่า สามารถจำแนกพลาสติกตัวอย่างได้ 3 กลุ่มดังนี้ กลุ่มที่ 1 เป็นพลาสติกตัวอย่างของ กั้นชนหน้ารถ A, กั้นชนหน้ารถ B, กรอบตะเบียนรถ A, กรอบพลาสติกของไฟหน้ารถ A และกรอบพลาสติกของไฟหน้ารถ B ในกลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยเศษพลาสติกตัวอย่างคือ ชุดแต่งด้านข้างรถ (skirt) A, กั้นชนหลังรถ B, กรอบตะเบียนรถ B, พลาสติกของกระจกมองข้าง A และพลาสติกของกระจกมองข้าง B ส่วนเศษพลาสติกตัวอย่างที่เหลือทั้งหมดรวมอยู่ในกลุ่มที่ 3

บทที่ 5

บทสรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

สรุปและอภิปรายผล

การหาความหนาแน่นและดัชนีหักเหของเศษแก้ว

จากผลการศึกษาค่าความหนาแน่นของเศษแก้วตัวอย่าง พบว่า แก้วน้ำใส ขามแก้วใส และจานแก้วใส มีค่าความหนาแน่นที่คำนวณได้แตกต่างจากเศษแก้วชนิดอื่น ส่วนเศษแก้วที่เหลือทั้งหมดมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกัน ซึ่งประกอบด้วย กระจกแผ่นเรียบใสและขวดน้ำอัดลม มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2.174 - 2.178 g/cm³ ส่วน กระจกประตูลอยน้ต กระจกหน้ารถยนต์ บีกเกอร์ใสและขวดเหล้าใส มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2.273 - 2.302 g/cm³ และเศษแก้วของ ขวดแก้วใสและกระจกหน้าต่างใส มีค่าความหนาแน่นในช่วง 2.444 - 2.451 g/cm³ ส่วนผลการศึกษาค่าดัชนีหักเหของเศษแก้วตัวอย่าง พบว่า เศษแก้วที่มีค่าดัชนีหักเหแตกต่างกันน้อยมากมีดังนี้ คือ แก้วน้ำใส กระจกหน้าต่างใส และจานแก้วใส มีค่าดัชนีหักเหอยู่ในช่วง 1.51648 - 1.51655 ส่วนค่าดัชนีหักเหของ ขามแก้วใสและกระจกหน้ารถยนต์ มีค่าเท่ากันคือ 1.51993 และเศษแก้วจาก ขวดน้ำอัดลมใส กระจกแผ่นเรียบใส และขวดแก้วใส มีค่าดัชนีหักเหอยู่ในช่วง 1.52103 - 1.52157 เศษแก้วที่เหลือ คือ บีกเกอร์ใส กระจกประตูลอยน้ต และขวดเหล้าใส มีค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยแตกต่างจากเศษแก้วชนิดอื่น เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ได้จากการหาค่าความหนาแน่นและดัชนีหักเหของเศษแก้วจำนวน 11 ชนิดประกอบกัน พบว่า กระจกแผ่นเรียบใสและขวดน้ำอัดลมใส มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2.174 - 2.178 g/cm³ และมีค่าดัชนีหักเหในช่วง 1.52103 - 1.52147 ซึ่งมีความแตกต่างกันน้อยมาก ส่วนเศษแก้วที่เหลือทั้งหมด 9 ชนิด มีค่าความหนาแน่นและดัชนีหักเห

แตกต่างกันตามชนิดของเศษแก้วนั้นๆ ทั้งนี้มีความเป็นไปได้ว่าทั้งค่าความหนาแน่นและดัชนีหักเหสามารถนำมาระบุชนิดของเศษแก้วได้ ถ้าหากนำค่าความหนาแน่นหรือค่าดัชนีหักเห ค่าใดค่าหนึ่งเพียงอย่างเดียวมาจำแนกชนิดของเศษแก้วตัวอย่าง อาจยังไม่เพียงพอที่จะนำมาใช้ในการระบุชนิดของเศษแก้ว โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ พอว์ลัคและคณะ (Pawluk-Kolc, M., J. Zieba-Palus, and A. Parczewski 2008 : 222-228) กับของ ซุซูกิและคณะ (Suzuki et al. 2000 : 1195-1198) เนื่องจาก แก้วมีการกระจายของค่าดัชนีหักเหแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต เช่น ส่วนผสมที่ใช้ในการผลิต อุณหภูมิการหลอม อัตราการเย็นตัวลง เป็นต้น หรือขึ้นอยู่กับ รูปทรงของแก้ว ความหนาของเนื้อแก้ว ลักษณะของผิวแก้ว เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ค่าความหนาแน่นและดัชนีหักเหจึงเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของเศษแก้ว ซึ่งมีประโยชน์ในการนำมาจำแนกชนิดของเศษแก้วตัวอย่าง โดยเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยและสอดคล้องกับสมมติฐานของการวิจัย คือ เศษแก้วที่ได้จากกระบวนการผลิตต่างกัน จะมีความหนาแน่นและดัชนีหักเหต่างกัน ดังจะเห็นได้จากเศษแก้วตัวอย่าง เช่น ขวดน้ำอัดลมใส ขวดเหล้าใส และขวดแก้วใส เป็นต้น ทั้งหมดเป็นเศษแก้วตัวอย่างจากขวดใสเหมือนกัน แต่มีกระบวนการผลิตต่างกัน จึงมีค่าความหนาแน่นและดัชนีหักเหต่างกัน

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของเศษพลาสติก

การหาสมบัติทางความร้อนของชิ้นส่วนรถยนต์บางชนิดที่เป็นพลาสติกด้วยเทคนิค DSC พบว่าเศษพลาสติกตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ทั้งหมดแสดงผลเป็นเทอร์โมแกรมแบบดูดกลืนความร้อน โดยมี 7 ตัวอย่าง ให้เทอร์โมแกรมแบบดูดกลืนความร้อน 2 peak มีอุณหภูมิของ peak แรก และ peak ที่ 2 อยู่ในช่วง $162-221^{\circ}\text{C}$ และ $410-476^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ โดยมีค่า ΔH ของทั้งสอง peak ตามลำดับดังนี้คือ $1.25-3.30 \text{ J/g}$ และ $11.17-17.90 \text{ J/g}$ ส่วนอีก 10 ตัวอย่างให้เทอร์โมแกรมแบบดูดกลืนความร้อน 1 peak มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $335-484^{\circ}\text{C}$ และมีค่า ΔH อยู่ในช่วง $5.76-20.54 \text{ J/g}$ สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA นั้นเป็นการหาอุณหภูมิ onset temperature จากการเปลี่ยนแปลงมวล และคำนวณเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของตัวอย่างที่หายไป จากผลการวิเคราะห์พบว่าการเปลี่ยนแปลงมวลครั้งเดียวมี 14 ตัวอย่าง มีอุณหภูมิเนื่องจากการเปลี่ยนน้ำหนักอยู่ในช่วง

389.11-527.43°C มีเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปอยู่ในช่วง 37.90-100.23% ส่วนการเปลี่ยนแปลงมวล 2 ครั้งมี 3 ตัวอย่าง ซึ่งอุณหภูมิเนื่องจากการเปลี่ยนน้ำหนักครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 อยู่ในช่วงคือ 115.85-372.89°C และ 388.58-931.16°C ตามลำดับ โดยที่เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวอย่างที่หายไปครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีค่าตามลำดับต่อไปนี้คือ 1.95-21.97% และ 27.80-98.58% จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทั้ง DSC และ TGA สามารถจัดกลุ่มตัวอย่างได้ 3 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกเป็นพลาสติกตัวอย่างที่ทำมาจาก polypropylene ได้แก่ กั้นชนหน้ารถ, กรอบทะเบียนรถ และกรอบพลาสติกของไฟหน้ารถ และในกลุ่มที่ 2 ประกอบด้วย ชุดแต่งด้านข้างรถ (skirt), กั้นชนหลังรถและพลาสติกของกระจกมองข้าง พลาสติกตัวอย่างเหล่านี้ ทำมาจาก acrylonitrile styrene acrylate ส่วนในกลุ่มสุดท้าย ไม่สามารถจัดรวมอยู่ในกลุ่มใด เนื่องจากพลาสติกแต่ละชิ้นมีคุณสมบัติทางความร้อนแตกต่างจากพลาสติกทั้ง 2 กลุ่มข้างต้น อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC และ TGA แสดงความเป็นไปได้ที่จะใช้บ่งชี้ลักษณะเฉพาะของตัวอย่างพลาสติก ที่เก็บไปตรวจพิสูจน์ในทางนิติวิทยาศาสตร์ ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานของการวิจัย คือ ชนิดของพลาสติกจากองค์ประกอบต่างๆของรถยนต์ที่แตกต่างกันมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนและการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก เมื่อได้รับความร้อนแตกต่างกัน และสอดคล้องกับงานวิจัยของ คอสซิน (Causin et al., 2009) และของ ซาจัววาน (Sajwan et al. 2007 : 130-133) นั่นคือ เมื่อทำการวัดสมบัติเชิงความร้อนของชิ้นส่วนรถยนต์บางชนิดที่เป็นพลาสติกด้วยเทคนิค DSC และ TGA พบว่ามีเศษชิ้นส่วนพลาสติกตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิดโพลีเมอร์ แต่สามารถจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกับเศษชิ้นส่วนพลาสติกตัวอย่างที่มีการระบุชนิดโพลีเมอร์ โดยนำลักษณะของการเกิด peak และอุณหภูมิที่เกิด peak ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC มาใช้ในการระบุชนิดของโพลีเมอร์ที่อยู่ในกลุ่มนั้น นอกจากนี้ ผลการวิจัยที่ได้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ สุทธิพงษ์ (สุทธิพงษ์ สุราพิทักษ์สกุล, 2552) ที่ได้นำเทคนิคการวิเคราะห์ด้วย DSC และ TGA มาจำแนกประเภทของฟิล์มกรองแสงรถยนต์ ทั้งสองเทคนิคนี้เป็นที่ยอมรับในระดับสากล สามารถใช้ตัวอย่างในการวิเคราะห์เพียงปริมาณเล็กน้อย มีวิธีการเตรียมตัวอย่างไม่ยุ่งยากซับซ้อน และมีราคาไม่แพง

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากประเทศไทย ยังไม่มีการนำค่าดัชนีหักเหของแก้วชนิดต่างๆ มาทำเป็นฐานข้อมูล แม้ว่าจะมีหลายหน่วยงานที่ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับแก้ว หรือรับวิเคราะห์แก้วในเชิงพาณิชย์ก็ตาม ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงเป็นการจุดประกายให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ได้ทำการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติม เพื่อประโยชน์ต่อไปในอนาคต
2. ในการจำแนกเศษแก้วควรใช้เทคนิคอื่นเพิ่มเติม เช่น เทคนิค ICP หรือ เทคนิค XRF เป็นต้น เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกเศษแก้ว
3. ควรเพิ่มตัวอย่างชิ้นส่วนรถยนต์ที่เป็นพลาสติกให้มีความหลากหลายมากขึ้น หากทราบชนิดของพลาสติกที่นำมาวิเคราะห์ จะช่วยเพิ่มความเชื่อมั่นว่าผลการวิเคราะห์เศษพลาสติกที่ได้ นั้นสอดคล้องตรงตามหลักการ

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

กวี หวังนิเวศน์กุล. วัสดุวิศวกรรมก่อสร้าง. กรุงเทพฯ : บริษัท วิ.พรินทร์ จำกัด, 2552.

เกศินี เหมวิเชียร และ พริยชาติ สุวรรณมาลา. การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ ตอนที่ 1 เครื่องดีฟ

เฟอเรนเซียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ [Online], เข้าถึงเมื่อ 14 กุมภาพันธ์ 2555. เข้าถึงได้

จาก <http://www.tint.or.th/nkc/nkc51/nkc5102/nkc5102t.html>

ครูผู้น้อย [นามแฝง]. HDPE High Density Polyethylene [Online], เข้าถึงเมื่อ 21 มกราคม 2555.

เข้าถึงได้จาก <http://www.foodnetworksolution.com/vocab/wordcap/HDPE>

จินตมัย สุวรรณประทีป. การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.,

2547.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คณะวิทยาศาสตร์. ฟิสิกส์ 2. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. เคมีโพลิเมอร์พื้นฐาน. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2527.

_____ . โพลิเมอร์เชิงพาณิชย์. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2526.

ชาญวิทย์ คำเจริญ. ความหนาแน่นของสาร [Online], เข้าถึงเมื่อ 7 กุมภาพันธ์ 2555. เข้าถึงได้จาก

<http://202.129.0.133/createweb/00000/00000-59.html>

บริการข้อมูลวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว. วัสดุแก้ว [Online], เข้าถึงเมื่อ 14 กุมภาพันธ์

2555. เข้าถึงได้จาก <http://www2.mtec.or.th/th/research/GSAT/glassweb/define.html>

ประเภทของกระจกพื้นฐาน [Online], เข้าถึงเมื่อ 20 มกราคม 2555. เข้าถึงได้จาก [http://www.av-](http://www.av-glass.com/?p=103)

[glass.com/?p=103](http://www.av-glass.com/?p=103)

ปรียา อนุพงษ์อ้ออาจ. การหักเหของแสง [Online], เข้าถึงเมื่อ 18 มกราคม 2555. เข้าถึงได้จาก

http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh_6.htm

พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์. พลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 11. กรุงเทพฯ : ห.จ.ก.ป. สัมพันธ์พาณิชย์, 2537.

พิภพ สุนทรสมัย. วัสดุวิศวกรรมการก่อสร้าง. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : บริษัท ประชาชน จำกัด,

2536.

พลาสติกในชีวิตประจำวัน [Online], เข้าถึงเมื่อ 26 มกราคม 2555. เข้าถึงได้จาก

<http://kanchanapisek.or.th/kp6/New/sub/book/book.php?book=28&chap=8&>

[page=t28-8-infodetail06.html](http://kanchanapisek.or.th/kp6/New/sub/book/book.php?book=28&chap=8&page=t28-8-infodetail06.html)

มานพ ต้นตระบันจิตต์. วัสดุวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 12. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 2548.

แมน อมรสิทธิ์ และคณะ. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ : บริษัท

ชวนพิมพ์ 50 จำกัด, 2553.

สุทธิพงษ์ สุธาพิทักษ์สกุล. “การตรวจหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มกรองแสงรถยนต์โดยการ

วิเคราะห์เชิงความร้อนและ UV-VIS spectrophotometry เพื่องานด้านนิติวิทยาศาสตร์”

รายงานชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 ศูนย์โรงเรียนพระปฐมวิทยาลัย, 2552.

สุนันท์ สายกระสุน. การวิเคราะห์เชิงความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 2. มหาสารคาม : สำนักพิมพ์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2553.

สุรพล รักวิจัย. ฟิสิกส์ 2 สำหรับวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542.

อภิชาติ ชื่นชอบ. หลักการทํางาน Refractometer [Online], เข้าถึงเมื่อ 14 กุมภาพันธ์ 2555.

เข้าถึงได้จาก http://gongrvd.multiply.com/journal/item/3?&show_interstitial=1&u=%2Fjournal%2Fitem

ASTVผู้จัดการออนไลน์. รวบหนุ่มขี่มาใจบาป บุกจัดตู้บริจาควัดลักเงินไปซื้อเหล้า [Online],

เข้าถึงเมื่อ 8 มีนาคม 2555. เข้าถึงได้จาก <http://www.thaiday.com/Local/ViewNews.aspx?NewsID=9540000158560>

Atom [นามแฝง]. ดัชนีหักเหแสง (Refractive index, RI) [Online], เข้าถึงเมื่อ 7 กุมภาพันธ์ 2555.

เข้าถึงได้จาก <http://www.thaioptic.com/2011/06/refractive-index.html>

JadeSeven [นามแฝง]. ชุดแต่ง Plastic ABS สำหรับ Mitsubishi ECar, CK, Cedia, New Lancer,

EX [Online], เข้าถึงเมื่อ 26 มกราคม 2555. เข้าถึงได้จาก <http://www.lancer-club.net/forum/index.php?topic=109284.0>

Neonglow [นามแฝง]. ครอบตานิรภัย GOG-NA-01 [Online], เข้าถึงเมื่อ 21 มกราคม 2555.

เข้าถึงได้จาก from <http://www.sgbksafebiz.com/category/safety-products/eye-protection/eyes-protection-goggle/>

Varani, David. กระจกโฟลิต [Online], เข้าถึงเมื่อ 20 มกราคม 2555. เข้าถึงได้จาก

<http://www.idealkote.com/Float-Glass-กระจกโฟลิต.html>

Varani, David. กระจกลวดลาย [Online], เข้าถึงเมื่อ 20 มกราคม 2555. เข้าถึงได้จาก

<http://www.idealkote.com/Pattern-Glass-กระจกลวดลาย.html>

ภาษาต่างประเทศ

Ablett, Eric et al. Applications of Total Internal Reflection [Online]. Accessed 18 January 2012.

Available from <http://2011sec21ss.wikispaces.com/Applications+of+ Total+ Internal+>

[Reflection](http://2011sec21ss.wikispaces.com/Applications+of+ Total+ Internal+ Reflection)

About DAco-Trade Ltd [Online]. Accessed 21 January 2012. Available from [http://daco-](http://daco-trade.com/)

[trade.com/](http://daco-trade.com/)

Bolur, Prabodh C. Properties of plastics [Online]. Accessed 29 December 2011. Available

from <http://www.pitfallsinmolding.com/polyproperties.html>

Case in polyvinyl chloride for iPhone 4/4S [Online]. Accessed 21 January 2012. Available from

http://www.sbs-power.com/iphone/protections_cover/734_case-in-polyvinyl-chloride-

[for-iphone-44s_TE8SCB40B.html](http://www.sbs-power.com/iphone/protections_cover/734_case-in-polyvinyl-chloride-for-iphone-44s_TE8SCB40B.html)

Causin, Valerio et al. "A Method Based on Thermogravimetry/Differential Scanning Calorimetry for the Forensic Differentiation of Latex Gloves." Forensic Science International, no. 188 (2009) : 57-63.

Chetty, S. Kanakaraju., and Son. Reflective glass [Online]. Accessed 20 January 2012.

Available from <http://www.skcglass.com/products.php>

Davidson, Michael W. Friedrich Johann Karl Becke [Online]. Accessed 20 January 2012.

Available from <http://micro.magnet.fsu.edu/optics/timeline/people/becke.html>

Evonik: First car windshield made of PMMA [Online]. Accessed 21 January 2012. Available

from [http://plasticker.de/news/shownews_en.php?nr=12280&nmin=100&div=&](http://plasticker.de/news/shownews_en.php?nr=12280&nmin=100&div=&special=&select=&sort=&begriff=&nmax=100&stag=&smon=&sjahr=&etag=&emon=&ejahr=&backto=/news/index_en.php)

[special=&select=&sort=&begriff=&nmax=100&stag=&smon=&sjahr=&etag=&emo](http://plasticker.de/news/shownews_en.php?nr=12280&nmin=100&div=&special=&select=&sort=&begriff=&nmax=100&stag=&smon=&sjahr=&etag=&emon=&ejahr=&backto=/news/index_en.php)

[n=&ejahr=&backto=/news/index_en.php](http://plasticker.de/news/shownews_en.php?nr=12280&nmin=100&div=&special=&select=&sort=&begriff=&nmax=100&stag=&smon=&sjahr=&etag=&emon=&ejahr=&backto=/news/index_en.php)

Guo, Jacky. NEUTRAL SILICONE [Online]. Accessed 26 January 2012. Available from

<http://www.aluminumcompositepanel.biz/neutral-silicone/>

Hollow Submerged Membrane [Online]. Accessed 26 January 2012. Available from

<http://www.nordgroup.com.cn/product2.htm>

Kitchen Basics 101 – Tricks of the Trade [Online]. Accessed 26 January 2012. Available from

[http://www.supplierlist.com/product_view/jmgykj/93040/100418/polycarbonate_](http://www.supplierlist.com/product_view/jmgykj/93040/100418/polycarbonate_sheets.htm)

[sheets.htm](http://www.supplierlist.com/product_view/jmgykj/93040/100418/polycarbonate_sheets.htm)

M [pseud.]. What is Melamine? [Online]. Accessed 26 January 2012. Available from

<http://cat-chitchat.pictures-of-cats.org/2009/02/what-is-melamine.html#!/>

2009/02/what-is-melamine.html

National Physical Laboratory. Properties of organic compounds [Online]. Accessed 26 February

2012. Available from http://www.kayelaby.npl.co.uk/chemistry/3_3/3_3.html

Newell, Guy. BAKELITE [Online]. Accessed 26 January 2012. Available from

<http://www.nimrodplastics.com.au/product-bakelite.htm>

NEW PU Design Polyurethane Front Lip Mazda MX5 90/97 [Online]. Accessed 26 January

2012. Available from <http://www.fullcartuning.nl/details.php?intID=43441>

&setlang=EN

NeoEase [pseud.]. Kitchen Basics 101 – Tricks of the Trade [Online]. Accessed 21 January

2012. Available from <http://saucymoi.wordpress.com/>

Overhead Conveyor Trolleys and Shackles [Online]. Accessed 21 January 2012. Available from

[http://www.mirnezamco.com/products/poultry/overhead_conveyor_trolleys_shackles.](http://www.mirnezamco.com/products/poultry/overhead_conveyor_trolleys_shackles)

htm

Park, Eung-Ho. I am Looking at You [Online]. Accessed 26 January 2012. Available from

<http://www.edwardwinkleman.com/2005/05/artist-of-week-052305.html>

Pedrotti, Leno S. Basic Geometrical Optics [Online]. Accessed 18 January 2012. Available from

http://cord.org/step_online/st1-3/st13ei4.htm

PEEK Cable Ties [Online]. Accessed 21 January 2012. Available from <http://accuglassproducts.com/product.php?productid=16966>

Polyimide heater 18.60 W/cm² [Online]. Accessed 26 January 2012. Available from

<http://www.directindustry.com/prod/minco/polyimide-heaters-5076-475766.html>

Properties of Styrene-Butadiene Rubber [Online]. Accessed 26 January 2012. Available from

http://www.ehow.co.uk/info_8633410_properties-styrenebutadiene-rubber.html

Qubaisi, Khadem Al., and Gerhard Roiss. Easing the burden for both small and luxury car

manufacturers [Online]. Accessed 21 January 2012. Available from

<http://www.borealisgroup.com/industry-solutions/mobility/automotive-weight-debate/>

Sajwan, Madhuri., Saroj Aggarwal, and R.B. Singh. "Forensic characterization of HDPE Pipes

by DSC." Forensic Science International, no. 175 (2008) : 130-131.

Science Museum. Personal and domestic accessories made of urea formaldehyde, 1930-1960.

[Online]. Accessed 26 January 2012. Available from <http://www.sciencemuseum.org.uk/images/I015/10276753.aspx>

Scientific Working Group for Materials Analysis. "Glass Refractive Index Determination."

Forensic Science Communications 7, no. 1 (January 2005) : n. pag.

Sealed Insulating Glass [Online]. Accessed 20 January 2012. Available from <http://www.made-in-china.com/showroom/blueskyglass/product-detailQbHnuwUoYepi/China-Sealed-Insulating-Glass.html>

Shoes Cover [Online]. Accessed 21 January 2012. Available from <http://www.advance-pack.co.th/contents.php?cat=9>

Skoog, Douglas A. et al. Fundamentals of Analytical Chemistry. 8th ed. United States of America : R. R. Donnelley, 2004.

StorminMatt [pseud.]. Fiberglass in Newports (Tokyosmash!) [Online]. Accessed 26 January 2012. Available from <http://honda-tech.com/showthread.php?t=2310278>

Toughened / Tempered Glass (DF-02) [Online]. Accessed 20 January 2012. Available from <http://dongfa-glass.en.made-in-china.com/product/PMYQKmqJqfho/China-Toughened-Tempered-Glass-DF-02-.html>

Trade and Generic names [Online]. Accessed 29 December 2011. Available from <http://www.cityplastics.com.au/generic.html>

Unsaturated polyester resin [Online]. Accessed 26 January 2012. Available from http://www.alibaba.com/product-gs/441022139/Unsaturated_polyester_resin.html

Wikipedia, the free encyclopedia. Density [Online]. Accessed 14 February 2012. Available from <http://en.wikipedia.org/wiki/Density>

Willard, Hobart H. et al. Instrumental Methods of Analysis. 7th ed. United States of America : Wadsworth Publishing Co., 1988.

Wilmington, DE. Automotive News [Online]. Accessed 21 January 2012. Available from http://www2.dupont.com/Automotive/en_US/news_events/article20050815.html

Wired Glass about [Online]. Accessed 20 January 2012. Available from <http://www.ebcu.com/p-wired-glass-1077248.html>

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

น้ำหนัก ปริมาตร และความหนาแน่นของเศษแก้ว 11 ชนิด

ตารางที่ 11 ความหนาแน่นของเศษแก้วจากแก้วน้ำใส

ลำดับที่	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	0.6023	0.2	3.0115
2	0.4150	0.2	2.0750
3	0.2481	0.15	1.6540
4	0.6267	0.3	2.0890
5	0.3981	0.2	1.9905
6	0.3704	0.2	1.8520

ตารางที่ 12 ความหนาแน่นของเศษแก้วจากกระจกแผ่นเรียบใส

ลำดับที่	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	0.7921	0.4	1.9803
2	0.7765	0.4	1.9413
3	0.6697	0.3	2.2323
4	0.7362	0.3	2.4540
5	0.6728	0.3	2.2427
6	0.6585	0.3	2.1950

ตารางที่ 13 ความหนาแน่นของเศษแก้วจากขวดน้ำอัดลมใส

ลำดับที่	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	0.6360	0.3	2.1200
2	0.5704	0.3	1.9013
3	0.3451	0.15	2.3007
4	0.3952	0.2	1.9760
5	0.2956	0.15	1.9707
6	0.2800	0.1	2.8000

ตารางที่ 14 ความหนาแน่นของเศษแก้วจากขามแก้วใส

ลำดับที่	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	0.6527	0.3	2.1757
2	0.5327	0.25	2.1308
3	0.6858	0.3	2.2860
4	0.7072	0.3	2.3573
5	0.6841	0.3	2.2803
6	0.6588	0.3	2.1960

ตารางที่ 15 ความหนาแน่นของเศษแก้วจากกระจกประตูดยนต์

ลำดับที่	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	0.8005	0.4	2.0013
2	1.0773	0.4	2.6933
3	0.8026	0.4	2.0065
4	0.9640	0.4	2.4100
5	0.7327	0.3	2.4423
6	0.8335	0.4	2.0838

ตารางที่ 16 ความหนาแน่นของเศษแก้วจากกระจกหน้าต่างยนต์

ลำดับที่	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	0.5620	0.2	2.8100
2	0.5015	0.2	2.5075
3	0.5780	0.3	1.9267
4	0.4372	0.2	2.1860
5	0.4374	0.2	2.1870
6	0.6135	0.3	2.0450

ตารางที่ 17 ความหนาแน่นของเศษแก้วจากบีกเกอร์ใส

ลำดับที่	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	0.5538	0.25	2.2152
2	0.5254	0.25	2.1016
3	0.4462	0.2	2.2310
4	0.5032	0.2	2.5160
5	0.4183	0.2	2.0915
6	0.2511	0.1	2.5110

ตารางที่ 18 ความหนาแน่นของเศษแก้วจากขวดเหล้าใส

ลำดับที่	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	0.7674	0.3	2.5580
2	0.5149	0.2	2.5745
3	0.6293	0.3	2.0977
4	0.6113	0.3	2.0377
5	0.5267	0.2	2.6335
6	0.3823	0.2	1.9115

ตารางที่ 19 ความหนาแน่นของเศษแก้วจากจานแก้วใส

ลำดับที่	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	1.0016	0.4	2.5040
2	0.6567	0.3	2.1890
3	0.7546	0.3	2.5153
4	0.8171	0.3	2.7237
5	0.3989	0.2	1.9945
6	0.5794	0.25	2.3176

ตารางที่ 20 ความหนาแน่นของเศษแก้วจากขวดแก้วใส

ลำดับที่	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	0.5226	0.2	2.6130
2	0.6361	0.3	2.1203
3	0.6980	0.3	2.3267
4	0.6066	0.25	2.4264
5	0.6280	0.25	2.5120
6	0.5328	0.2	2.6640

ตารางที่ 21 ความหนาแน่นของเศษแก้วจากกระจกหน้าต่างใส

ลำดับที่	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	0.7453	0.3	2.4843
2	0.5275	0.2	2.6375
3	0.7078	0.3	2.3593
4	0.7567	0.3	2.5223
5	0.6789	0.3	2.2630
6	0.7315	0.3	2.4383

ตารางที่ 22 ความหนาแน่นเฉลี่ยของเศษแก้วตัวอย่าง 11 ชนิด (g/cm³)

ชนิดกระจก	D 1	D 2	D 3	D 4	D 5	D 6	Mean
แก้วน้ำใส	3.0115	2.0750	1.6540	2.0890	1.9905	1.8520	1.93210
กระจกแผ่นเรียบใส	1.9803	1.9413	2.2323	2.4540	2.2427	2.1950	2.17425
ขวดน้ำอัดลมใส	2.1200	1.9013	2.3007	1.9760	1.9707	2.8000	2.17811
ชามแก้วใส	2.1757	2.1308	2.2860	2.3573	2.2803	2.1960	2.23769
กระจกประตูรถยนต์	2.0013	2.6933	2.0065	2.4100	2.4423	2.0838	2.27285
กระจกหน้าต่างรถยนต์	2.8100	2.5075	1.9267	2.1860	2.1870	2.0450	2.27703

ตารางที่ 22 ความหนาแน่นเฉลี่ยของเศษแก้วตัวอย่าง 11 ชนิด (g/cm^3) (ต่อ)

ชนิดกระจก	D 1	D 2	D 3	D 4	D 5	D 6	Mean
บีกเกอร์ใส	2.2152	2.1016	2.2310	2.5160	2.0915	2.5110	2.27772
ขวดเหล้าใส	2.5580	2.5745	2.0977	2.0377	2.6335	1.9115	2.30214
จานแก้วใส	2.5040	2.1890	2.5153	2.7237	1.9945	2.3176	2.37402
ขวดแก้วใส	2.6130	2.1203	2.3267	2.4264	2.5120	2.6640	2.44373
กระจกหน้าต่างใส	2.4843	2.6375	2.3593	2.5223	2.2630	2.4383	2.45081

เมื่อ D คือ ความหนาแน่นของเศษแก้วตัวอย่าง

ทำการทดสอบความหนาแน่นที่คำนวณได้ทั้งหมดว่ามีค่าใดที่แตกต่างไปจากค่าอื่น
มากๆหรือไม่ (Q test หรือ Dixon test) ซึ่งมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$Q = d/w$$

เมื่อ

$$d = x_n - x_{n-1}$$

$$w = x_n - x_1$$

ถ้า $Q > Q_{\text{crit}}$ สามารถตัดทิ้งได้ โดยค่า Q_{crit} นี้สามารถดูได้จากตาราง (Skoog 2004 : 167-168)

เมื่อนำค่าความหนาแน่นของเศษแก้วตัวอย่าง 11 ชนิดมาทดสอบค่า Q แล้ว พบว่า แก้ว
น้ำใสมีความหนาแน่น 3.0115 โดยมีค่า Q ที่คำนวณได้คือ 0.6796 ส่วนค่า Q_{crit} ที่ระดับความเชื่อมั่น
95% คือ 0.625 นั่นคือ ความหนาแน่น 3.0115 ของแก้วน้ำใสสามารถตัดทิ้งได้ หรือกล่าวได้ว่ามี
โอกาส 95% ที่การตัดทิ้งนี้ถูกต้องแล้ว ส่วนค่าความหนาแน่นของเศษแก้วตัวอย่างอื่นนอกจากนี้ไม่
มีความแตกต่างไปจากค่าอื่นมาก

ภาคผนวก ข

คำดัชนีหักเหของสารเคมีและช่วงดัชนีหักเหของเศษแก้วตัวอย่าง 11 ชนิด

ค่าดัชนีหักเหของสารเคมี

ตารางที่ 23 ค่าดัชนีหักเหของสารเคมี 9 ชนิดที่วัดด้วย Refractometer

ลำดับที่	ชื่อสารเคมี	ค่าดัชนีหักเห
1	Dichloromethane	1.4202
2	Cyclohexanol	1.4498
3	Ethyl Benzoate	1.5022
4	Pyridine	1.5040
5	Methyl Benzoate	1.5124
6	Anisole	1.5136
7	Methyl Salicylate	1.5334
8	Benzyl Alcohol	1.5356
9	m-cresol	1.5358

ตารางที่ 24 ค่าดัชนีหักเหของสารเคมีผสมระหว่าง 2 (Cyclohexanol) กับ 3 (Ethyl Benzoate) ที่วัด

ด้วย Refractometer

ลำดับที่	ปริมาตรของสารเคมีผสม 2+3 (μ l)	ค่าดัชนีหักเห
1	500+500	1.4755
2	510+490	1.4748
3	520+480	1.4742
4	530+470	1.4736
5	540+460	1.4732
6	550+450	1.4726
7	560+440	1.4720
8	570+430	1.4715
9	580+420	1.4712

ตารางที่ 24 ค่าดัชนีหักเหของสารเคมีผสมระหว่าง 2 (Cyclohexanol) กับ 3 (Ethyl Benzoate) ที่วัด

ด้วย Refractometer (ต่อ)

ลำดับที่	ปริมาตรของสารเคมีผสม 2+3 (μl)	ค่าดัชนีหักเห
10	590+410	1.4704
11	600+400	1.4702

ตารางที่ 25 ค่าดัชนีหักเหของสารเคมีผสมระหว่าง 6 (Anisole) กับ 7 (Methyl Salicylate) ที่วัดด้วย

Refractometer

ลำดับที่	ปริมาตรของสารเคมีผสม 6+7 (μl)	ค่าดัชนีหักเห
1	50+950	1.5318
2	100+900	1.5310
3	150+850	1.5300
4	200+800	1.5288
5	250+750	1.5282
6	300+700	1.5270
7	350+650	1.5260
8	400+600	1.5250
9	450+550	1.5242
10	460+540	1.5240
11	470+530	1.5238
12	480+520	1.5236
13	490+510	1.5234
14	500+500	1.5232
15	550+450	1.5220
16	560+440	1.5218

ตารางที่ 25 ค่าดัชนีหักเหของสารเคมีผสมระหว่าง 6 (Anisole) กับ 7 (Methyl Salicylate) ที่วัดด้วย

Refractometer (ต่อ)

ลำดับที่	ปริมาตรของสารเคมีผสม 6+7 (μl)	ค่าดัชนีหักเห
17	570+430	1.5216
18	580+420	1.5214
19	590+410	1.5212
20	600+400	1.5210
21	610+390	1.5208
22	620+380	1.5206
23	630+370	1.5204
24	640+360	1.5202
25	650+350	1.5200
26	660+340	1.5198
27	670+330	1.5196
28	680+320	1.5194
29	690+310	1.5192
30	700+300	1.5190
31	710+290	1.5188
32	720+280	1.5186
33	730+270	1.5184
34	740+260	1.5182
35	750+250	1.5180
36	760+240	1.5178
37	770+230	1.5176
38	780+220	1.5174

ตารางที่ 25 ค่าดัชนีหักเหของสารเคมีผสมระหว่าง 6 (Anisole) กับ 7 (Methyl Salicylate) ที่วัดด้วย

Refractometer (ต่อ)

ลำดับที่	ปริมาตรของสารเคมีผสม 6+7 (μl)	ค่าดัชนีหักเห
39	790+210	1.5172
40	800+200	1.5171
41	810+190	1.5170
42	820+180	1.5168
43	830+170	1.5166
44	840+160	1.5165
45	850+150	1.5164
46	860+140	1.5162
47	870+130	1.5160
48	880+120	1.5158
49	890+110	1.5156
50	900+100	1.5155
51	910+90	1.5154
52	920+80	1.5152
53	930+70	1.5150
54	940+60	1.5148
55	950+50	1.5146

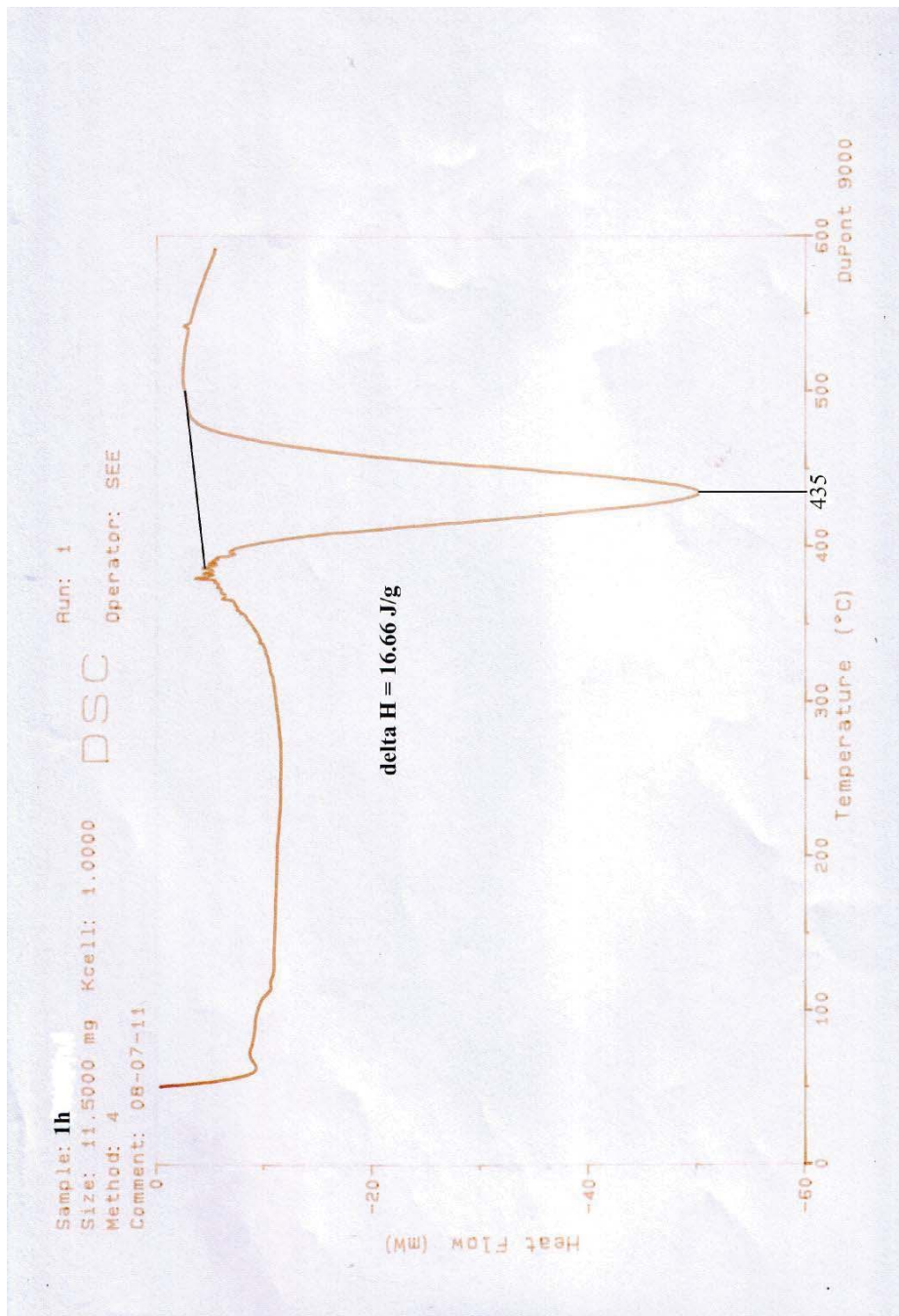
ช่วงดัชนีหักเหของแสงแก้วตัวอย่าง 11 ชนิด

ตารางที่ 26 ช่วงดัชนีหักเหของแสงแก้วตัวอย่าง 11 ชนิด

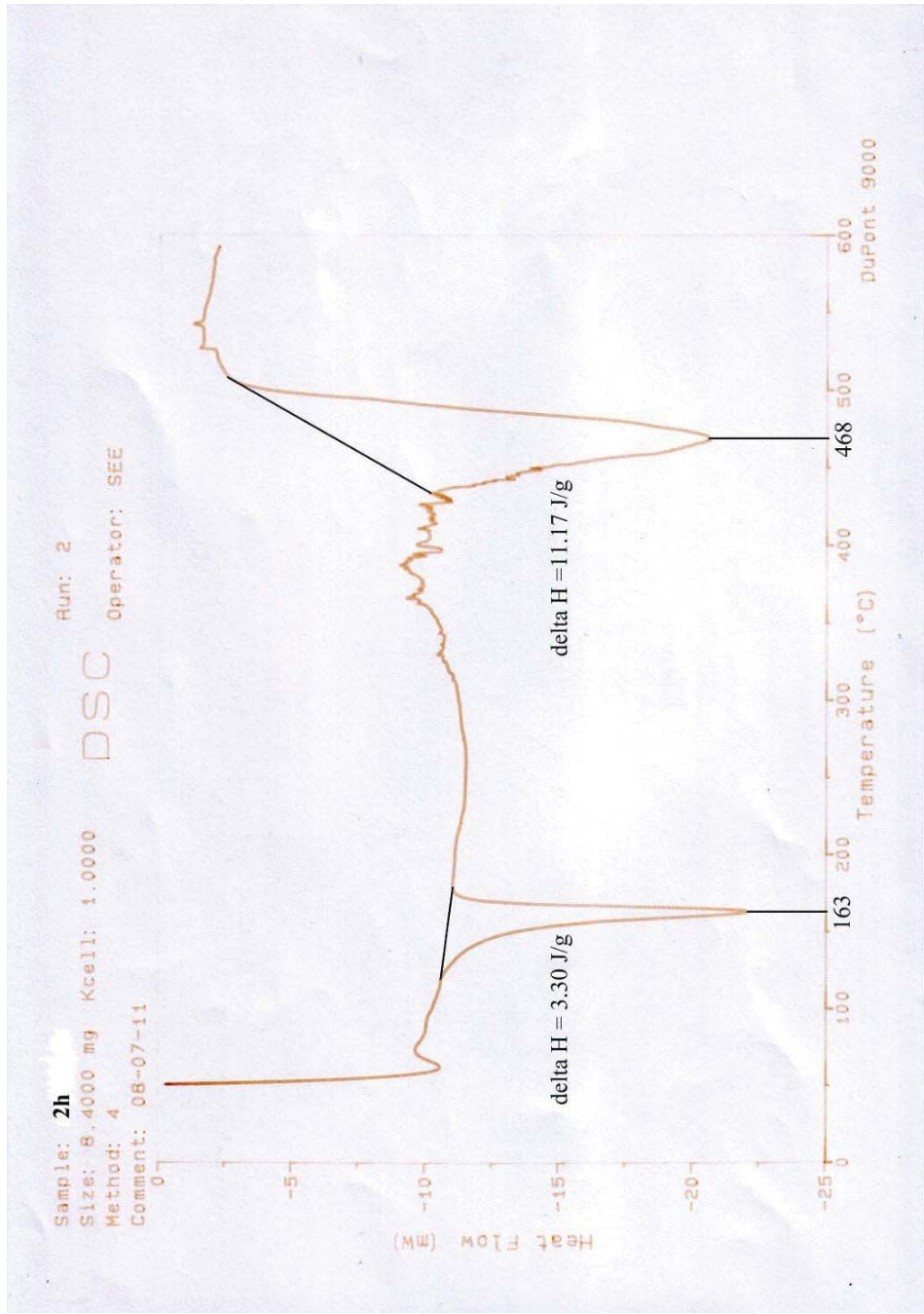
ชนิดกระจก	ช่วงดัชนีหักเหของแสงแก้วตัวอย่างแต่ละชนิด					
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5	ตัวอย่างที่ 6
บีกเกอร์ใส	1.4732 -	1.4726 -	1.4732 -	1.4720 -	1.4715 -	1.4715 -
	1.4736	1.4732	1.4736	1.4726	1.4720	1.4720
กระจก ประจูด	1.5156 -	1.5152 -	1.5152 -	1.5152 -	1.5152 -	1.5152 -
	1.5158	1.5154	1.5154	1.5154	1.5154	1.5154
แก้วน้ำใส	1.5165 -	1.5165 -	1.5164 -	1.5164 -	1.5164 -	1.5165 -
	1.5166	1.5166	1.5165	1.5165	1.5165	1.5166
กระจก หน้าต่างใส	1.5164 -	1.5166 -	1.5165 -	1.5165 -	1.5165 -	1.5165 -
	1.5165	1.5168	1.5166	1.5166	1.5166	1.5166
จานแก้วใส	1.5165 -	1.5164 -	1.5165 -	1.5165 -	1.5165 -	1.5164 -
	1.5166	1.5165	1.5166	1.5166	1.5166	1.5165
ชามแก้วใส	1.5198 -	1.5198 -	1.5198 -	1.5198 -	1.5198 -	1.5200 -
	1.5200	1.5200	1.5200	1.5200	1.5200	1.5202
กระจกหน้า รถยนต์	1.5200 -	1.5194 -	1.5194 -	1.5196 -	1.5202 -	1.5204 -
	1.5202	1.5196	1.5196	1.5198	1.5204	1.5206
ขวด น้ำอัดลมใส	1.5206 -	1.5210 -	1.5210 -	1.5210 -	1.5210 -	1.5210 -
	1.5208	1.5212	1.5212	1.5212	1.5212	1.5212
กระจกแผ่น เรียบใส	1.5214 -	1.5214 -	1.5214 -	1.5212 -	1.5214 -	1.5214 -
	1.5216	1.5216	1.5216	1.5214	1.5216	1.5216
ขวดแก้วใส	1.5216 -	1.5216 -	1.5214 -	1.5214 -	1.5214 -	1.5214 -
	1.5218	1.5218	1.5216	1.5216	1.5216	1.5216
ขวดเหล้าใส	1.5236 -	1.5234 -	1.5234 -	1.5236 -	1.5238 -	1.5234 -
	1.5238	1.5236	1.5236	1.5238	1.5240	1.5236

ภาคผนวก ค

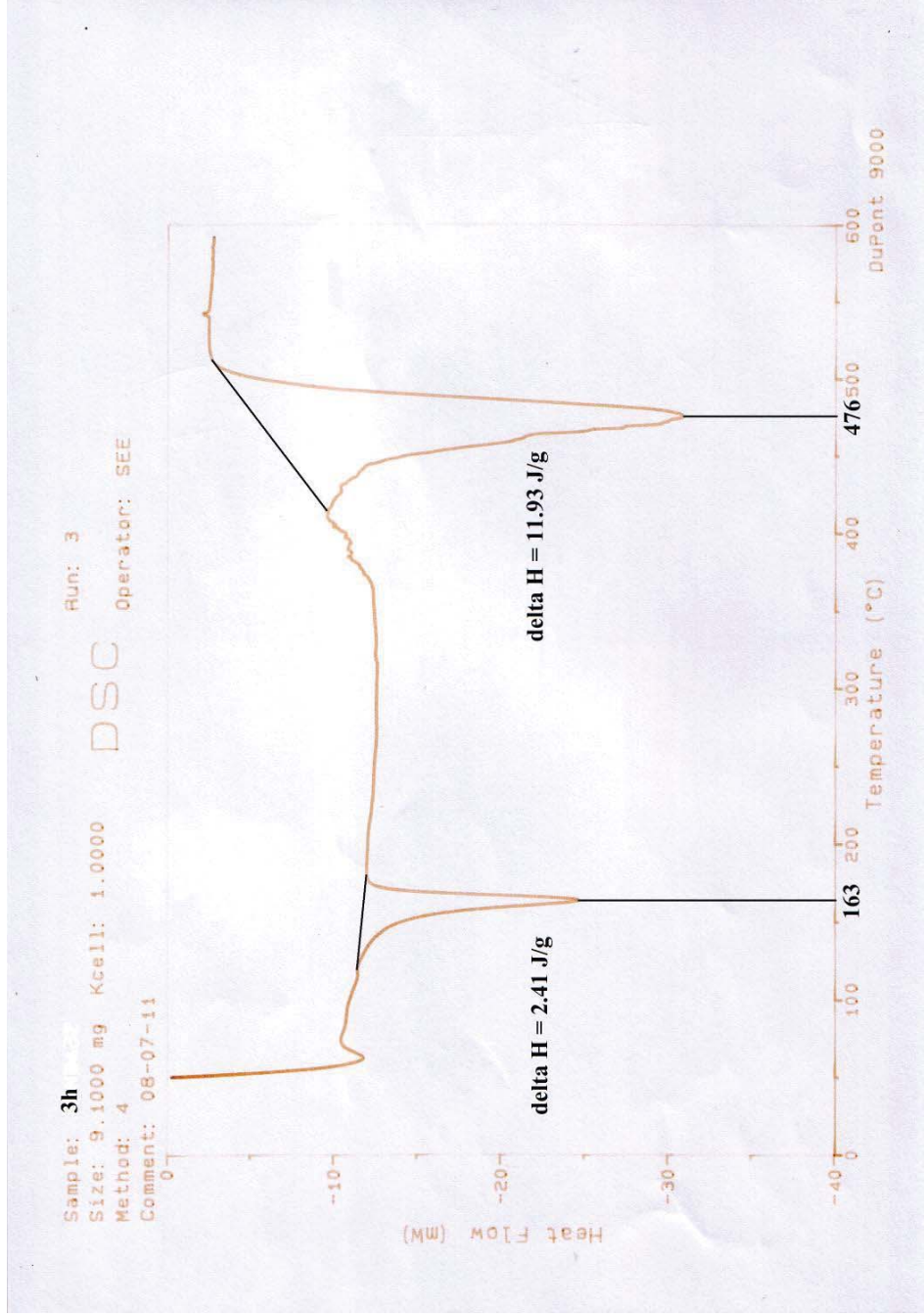
เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค DSC



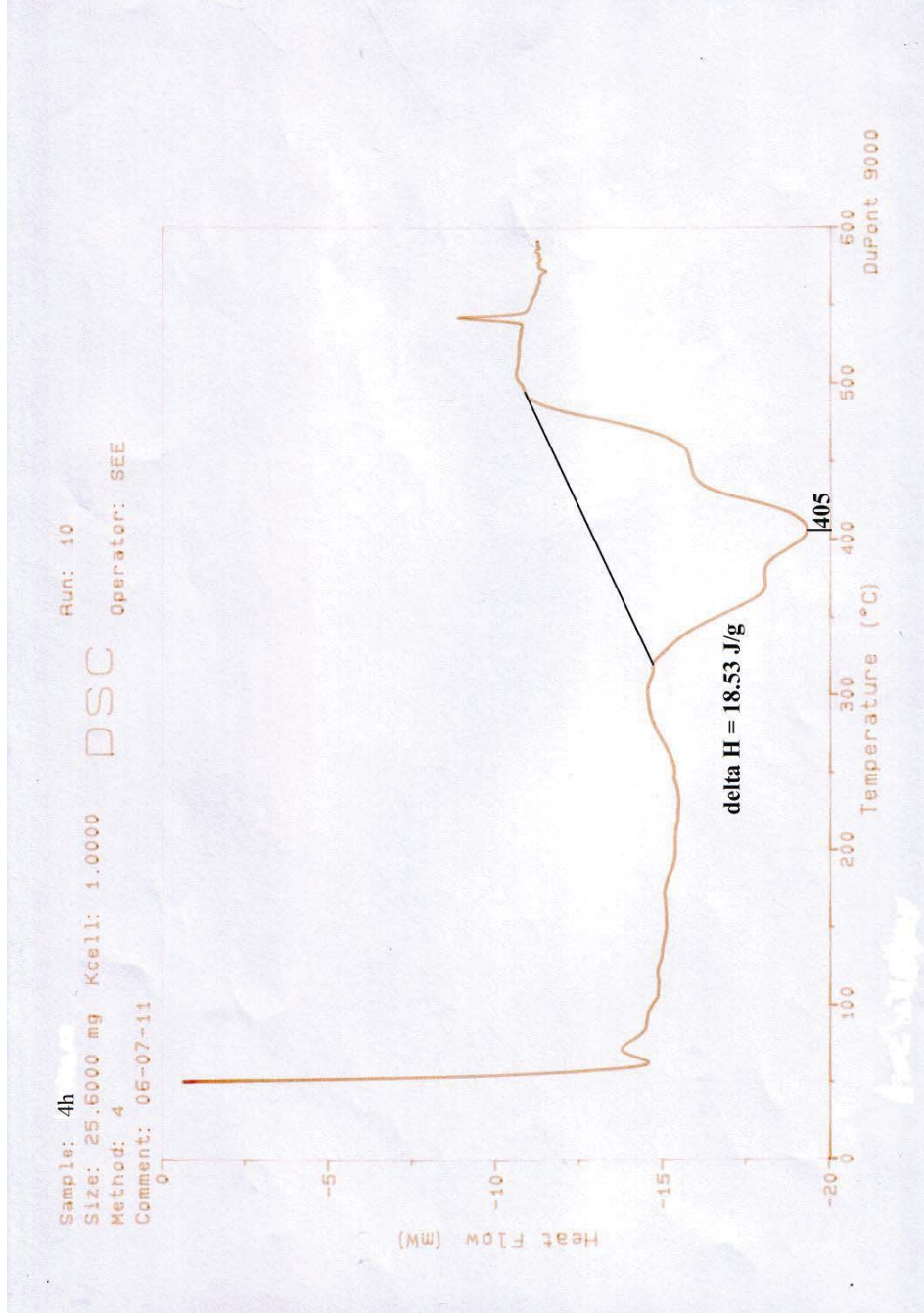
ภาพที่ 58 เทอร์โมแกรม DSC ของชุดแต่งด้านข้างรถ (skirt) ตัวอย่าง 1h



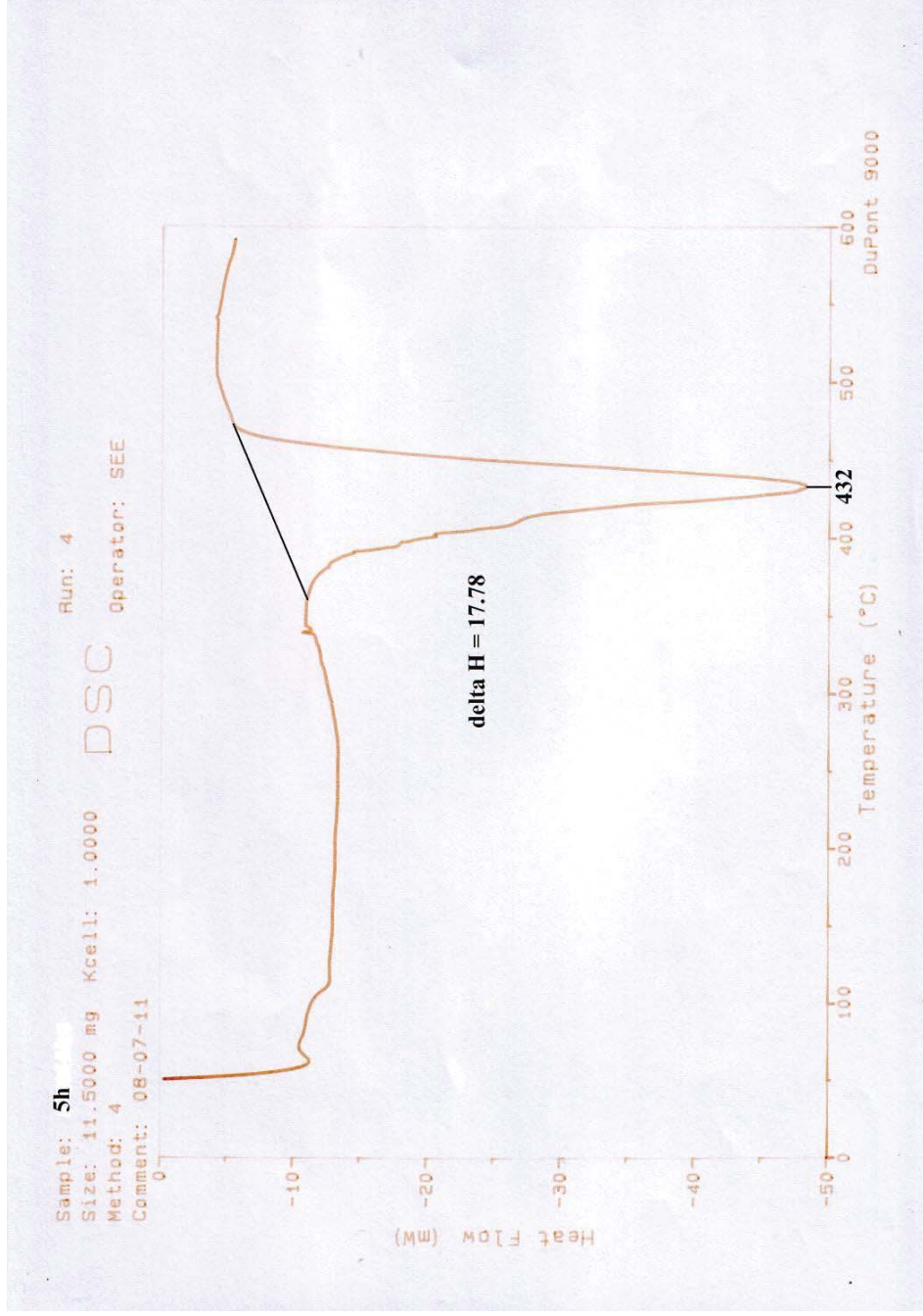
ภาพที่ 59 เทอร์โมแกรม DSC ของกันชนหน้ารถ ตัวอย่าง 2h



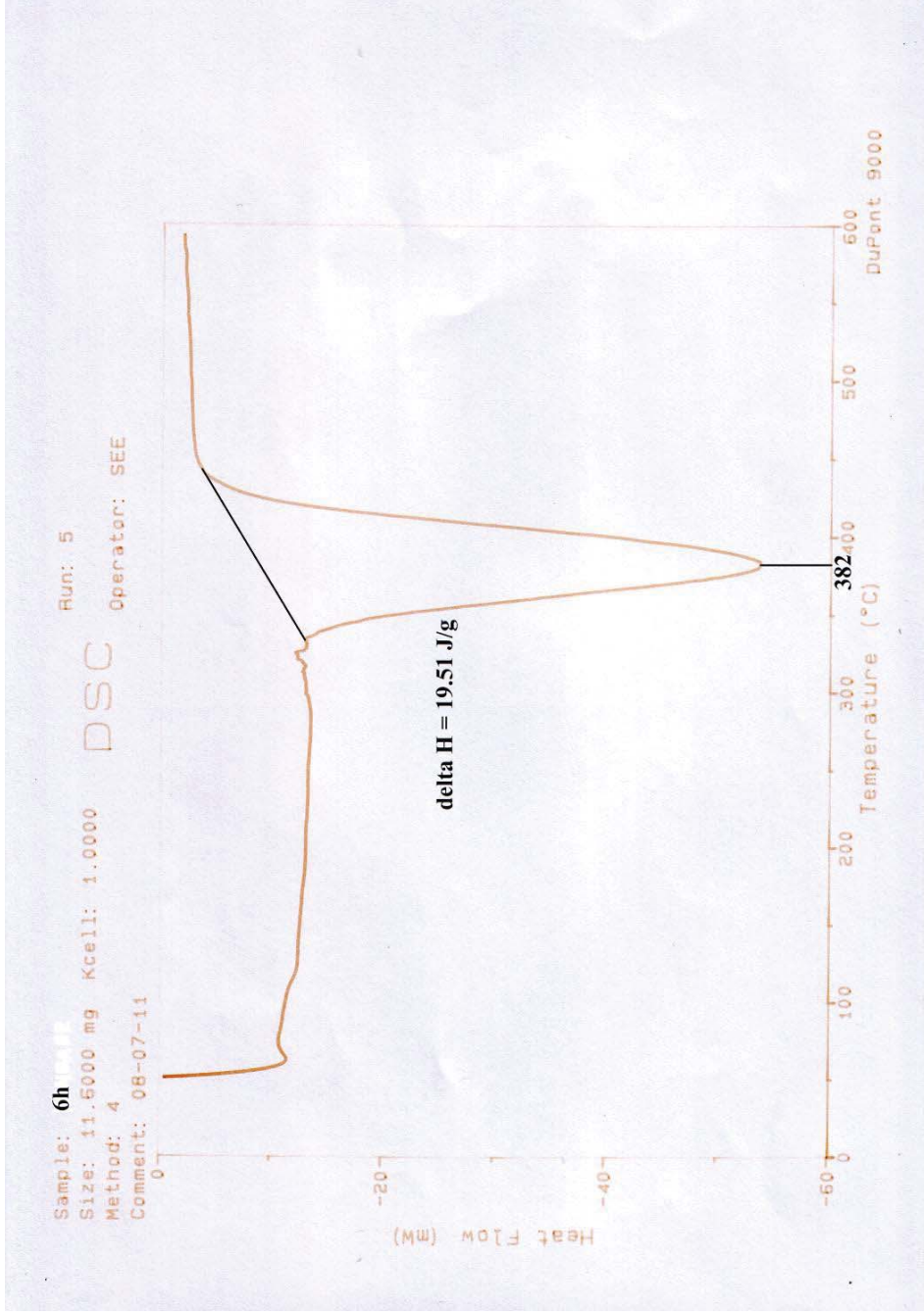
ภาพที่ 60 เทอร์โมแกรม DSC ของกรอบทะเบียนรถ ตัวอย่าง 3h



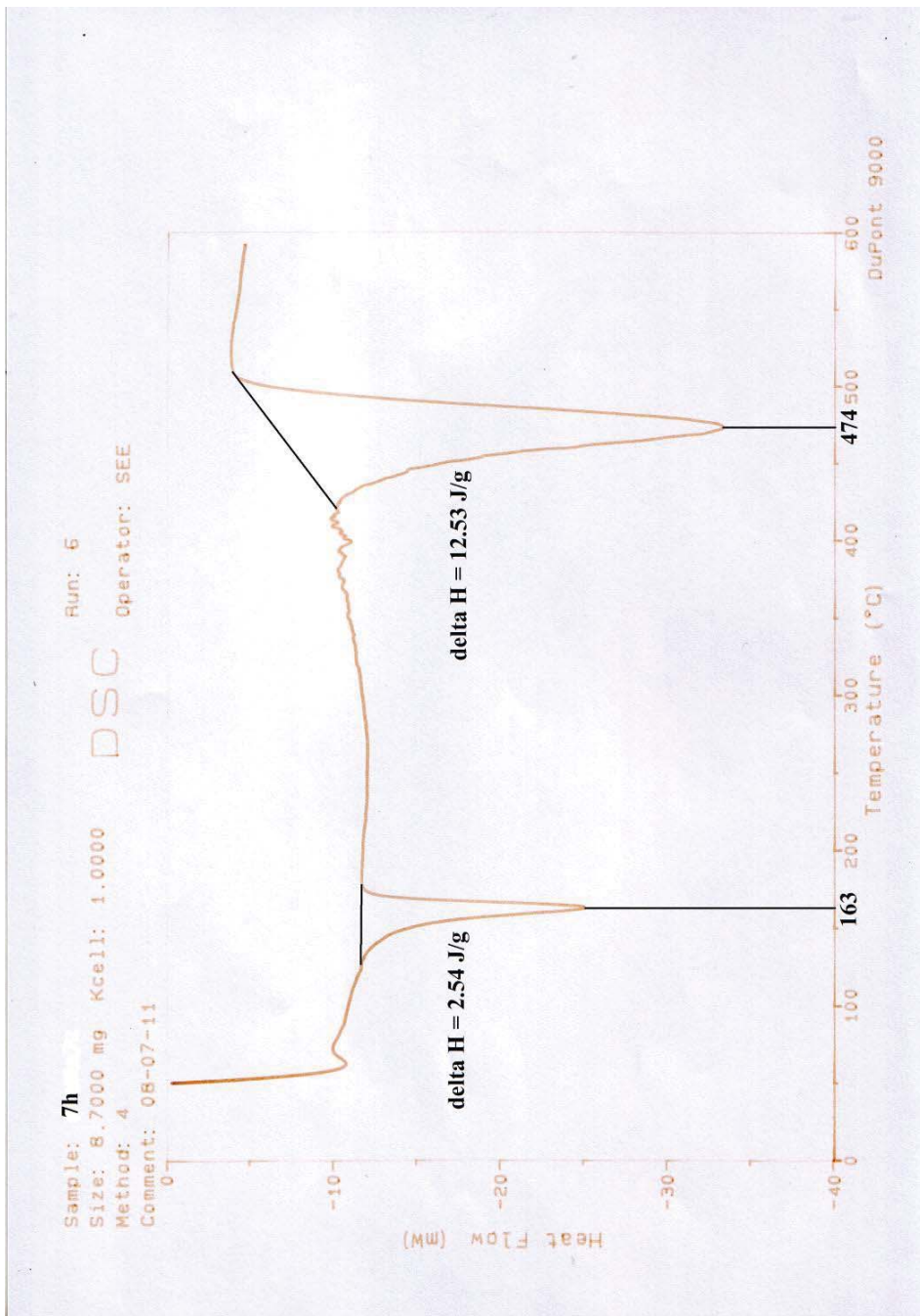
ภาพที่ 61 เทอร์โมแกรม DSC ของโคมไฟหน้า ตัวอย่าง 4h



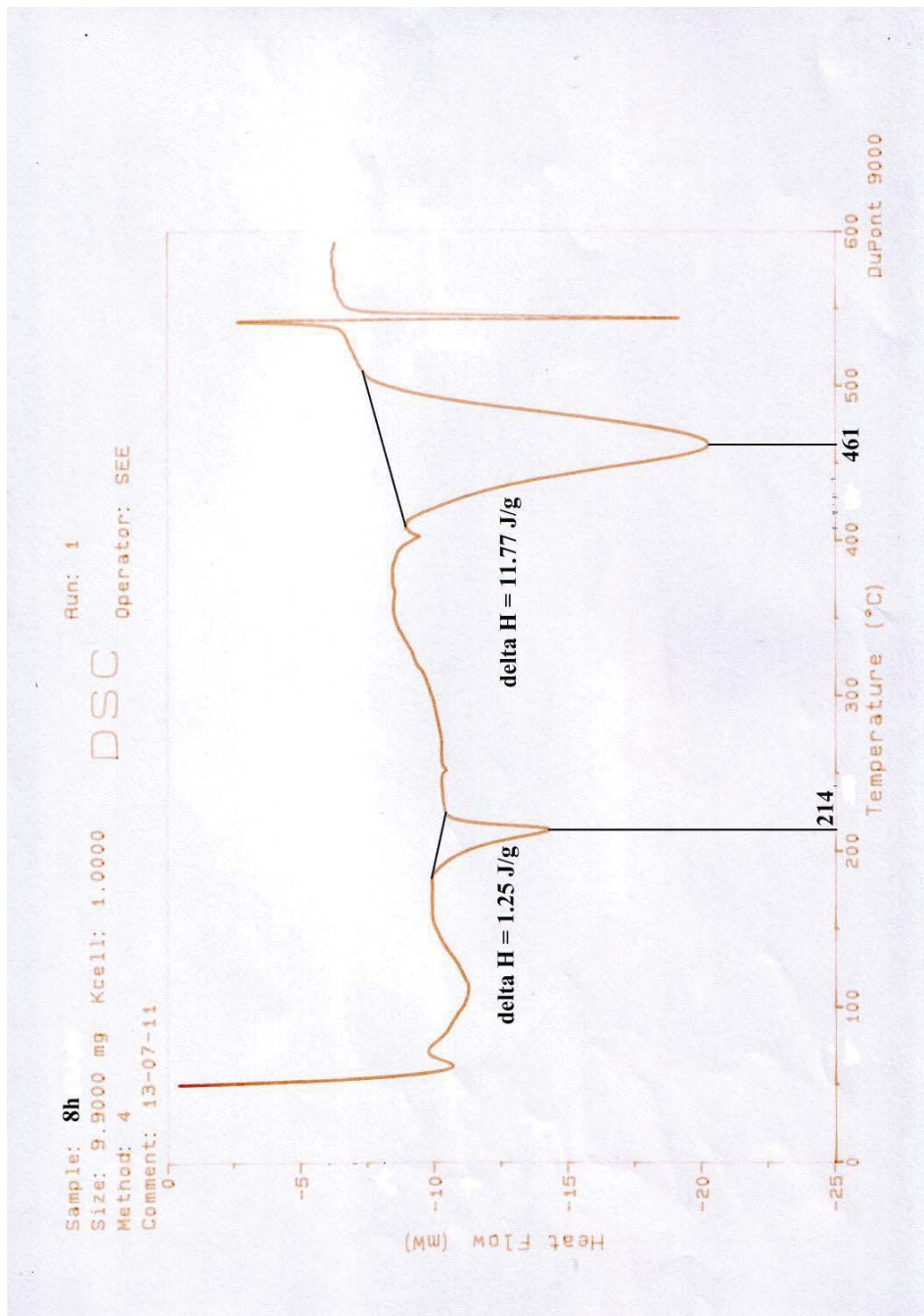
ภาพที่ 62 เทอร์โมแกรม DSC ของพลาสติกของกรรมของข้าง ตัวอย่าง 5h



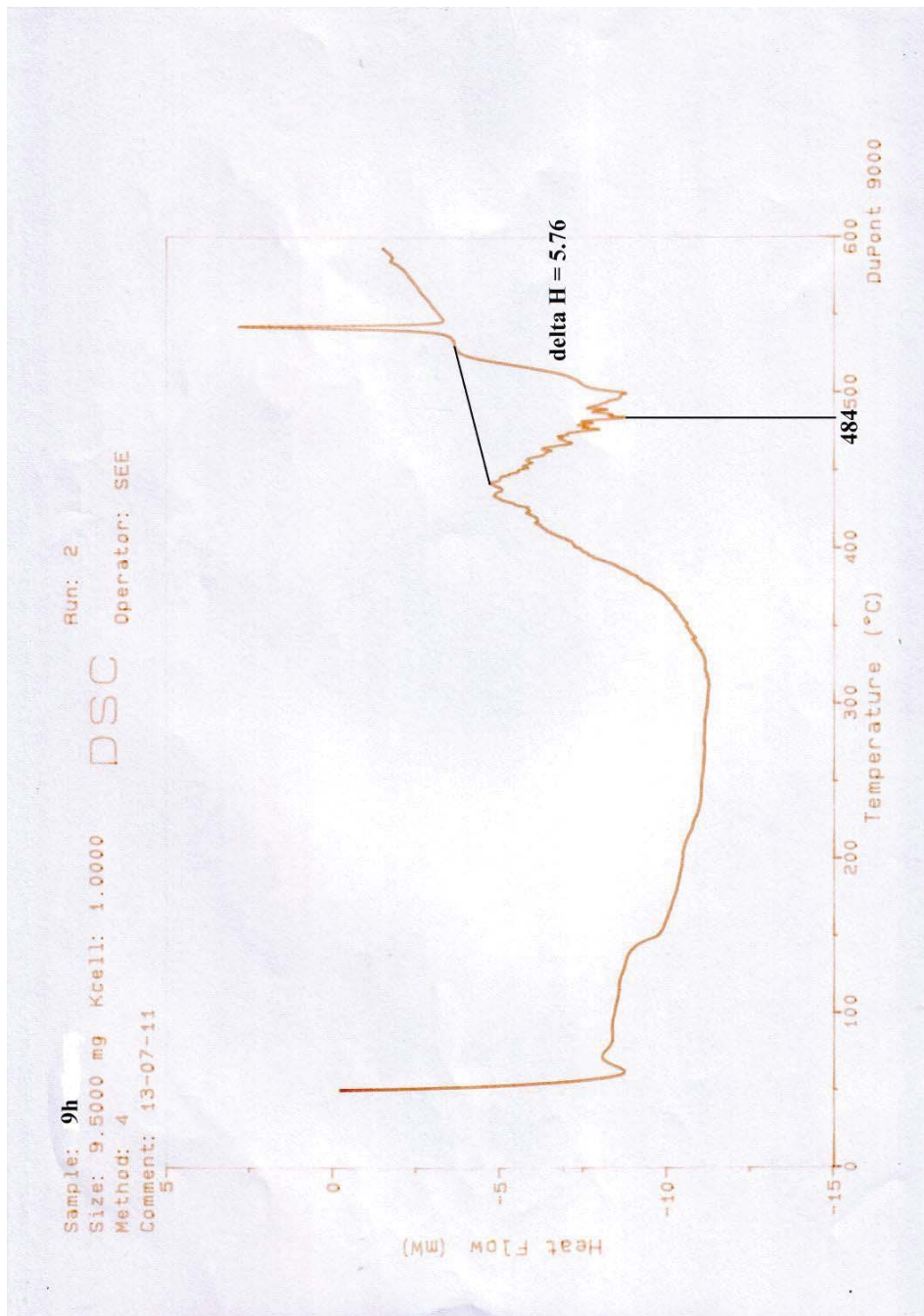
ภาพที่ 63 เทอร์โมแกรม DSC ของเลนส์โฟลิว ตัวอย่าง 6h



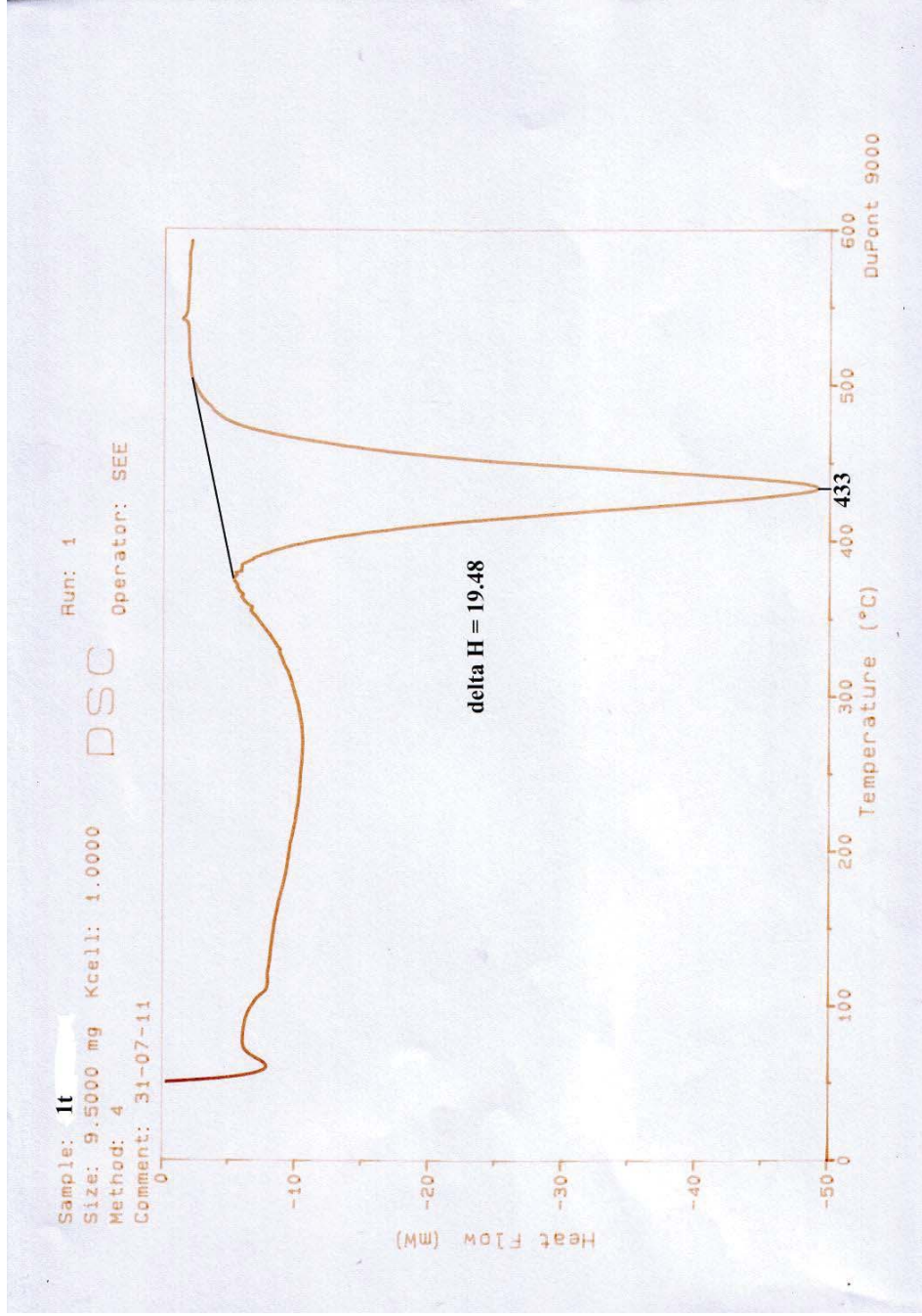
ภาพที่ 64 เทอร์โมแกรม DSC ของกรอบพลาสติกของไฟฟ้านำรถ ตัวอย่าง 7h



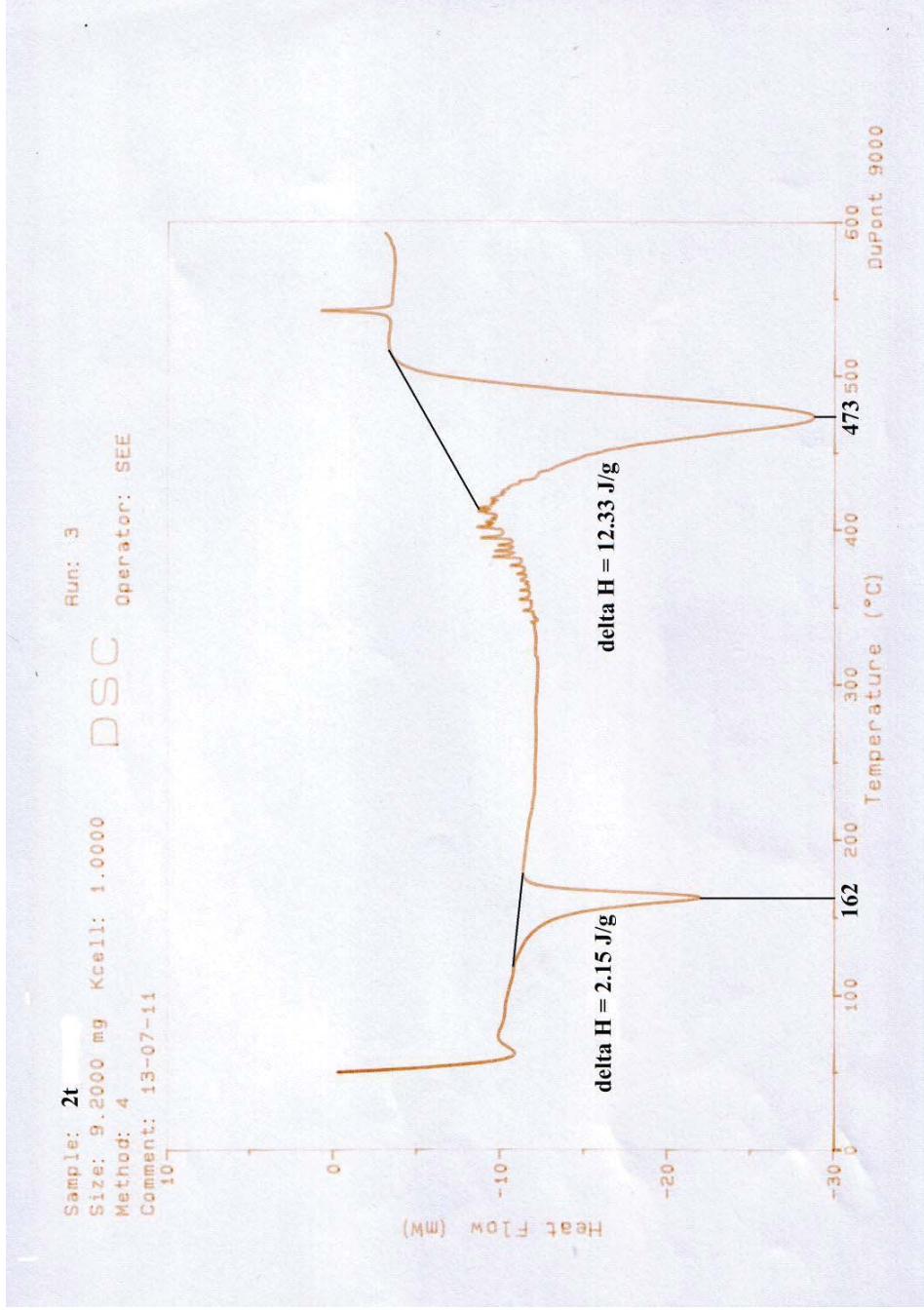
ภาพที่ 65 เทอร์โมแกรม DSC ของแวนิลาที่ระงับการงอกข้าง ตัวอย่าง 8h



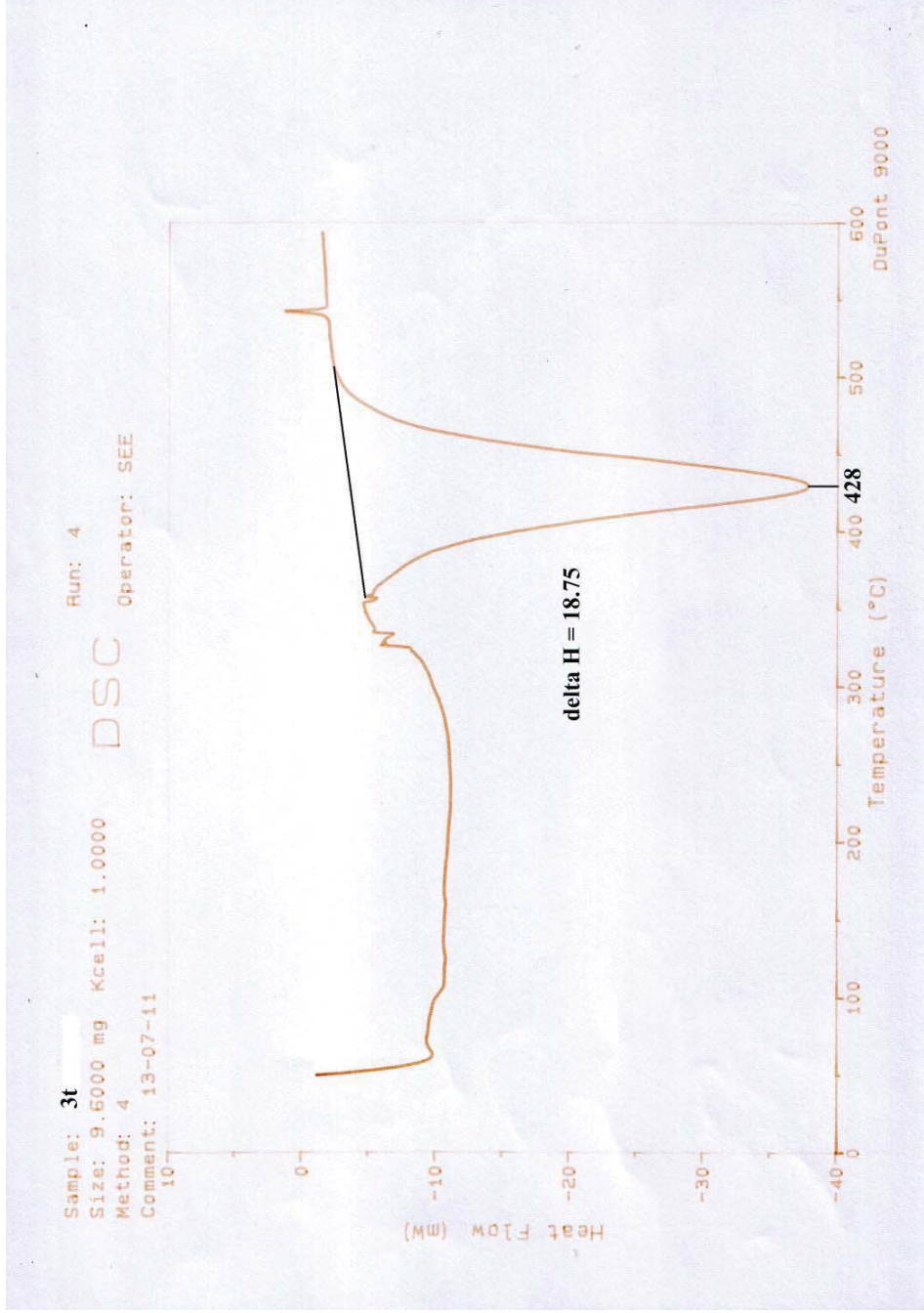
ภาพที่ 66 เทอร์โมแกรม DSC ของเส้นสี่ฟ้าน้ำรด ตัวอย่าง 9h



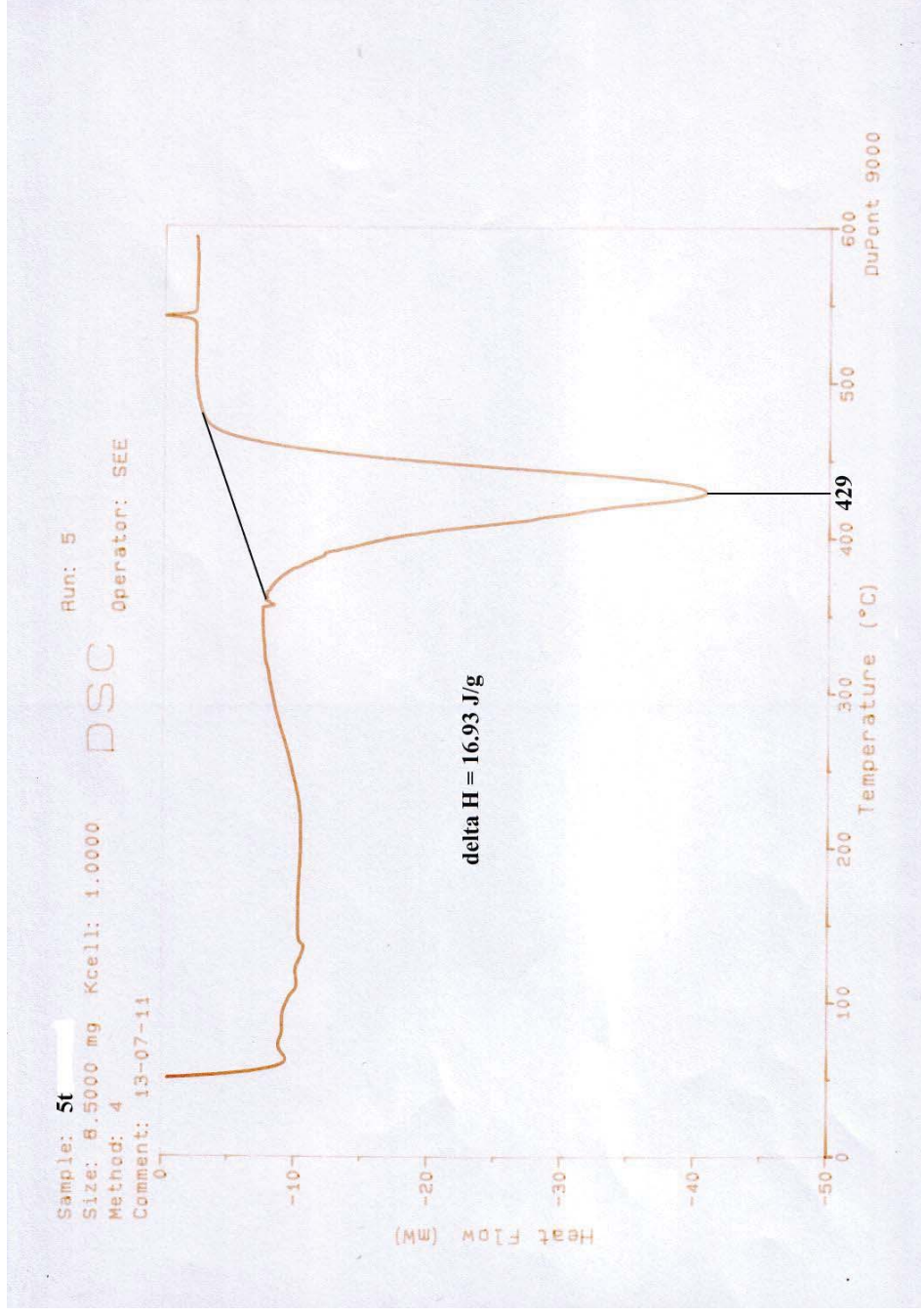
ภาพที่ 67 เทอร์โมแกรม DSC ของกันชนหลังรถ ตัวอย่าง 1t



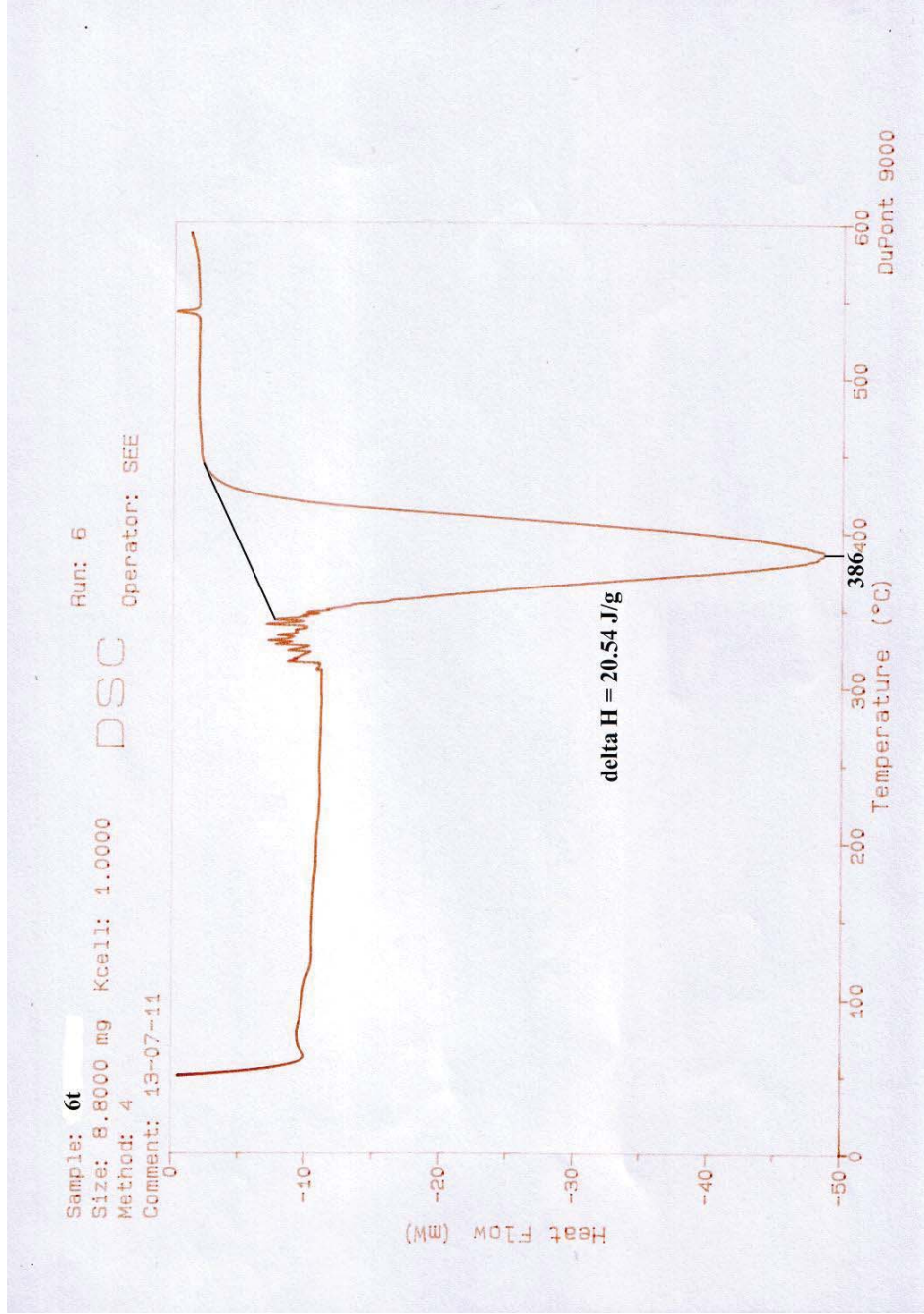
ภาพที่ 68 เทอร์โมแกรม DSC ของกันชนหน้ำารด ตัวอย่าง 2t



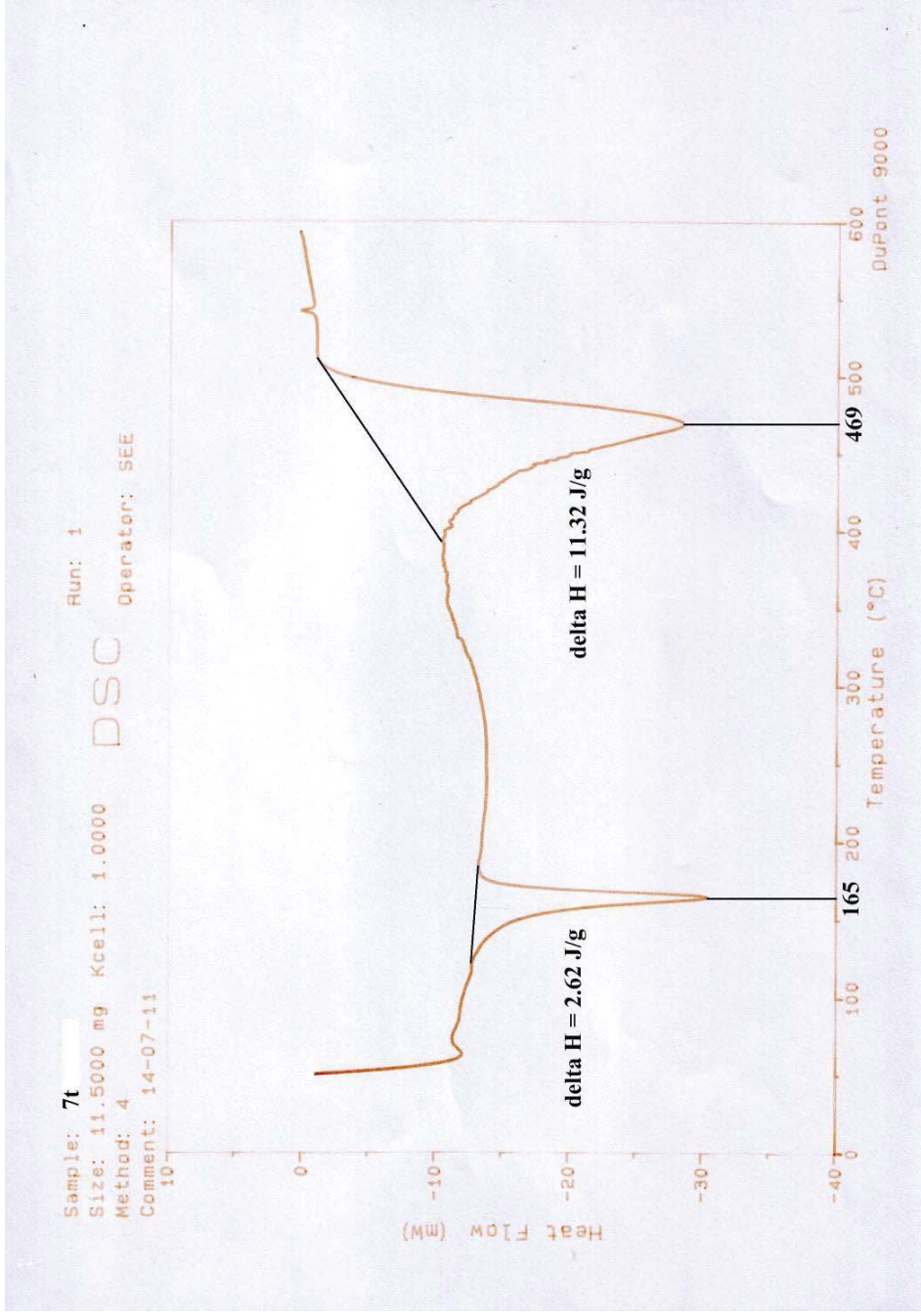
ภาพที่ 69 เทอร์โมแกรม DSC ของกรอบทะเลเบียร์รด ตัวอย่าง 3t



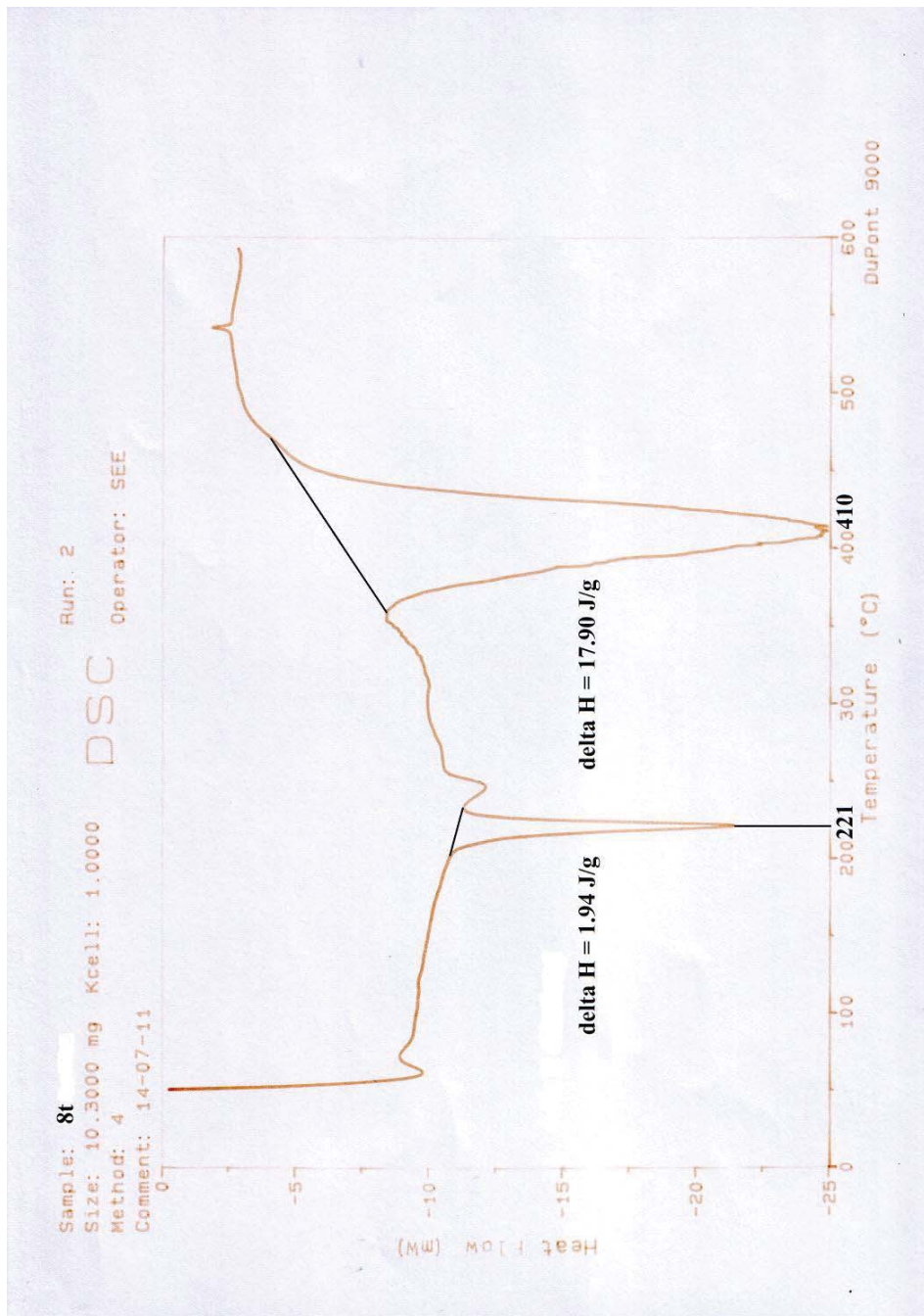
ภาพที่ 70 เทอร์โมแกรม DSC ของพลาสติกโพรพอกซีของแข็ง ตัวอย่าง 5t



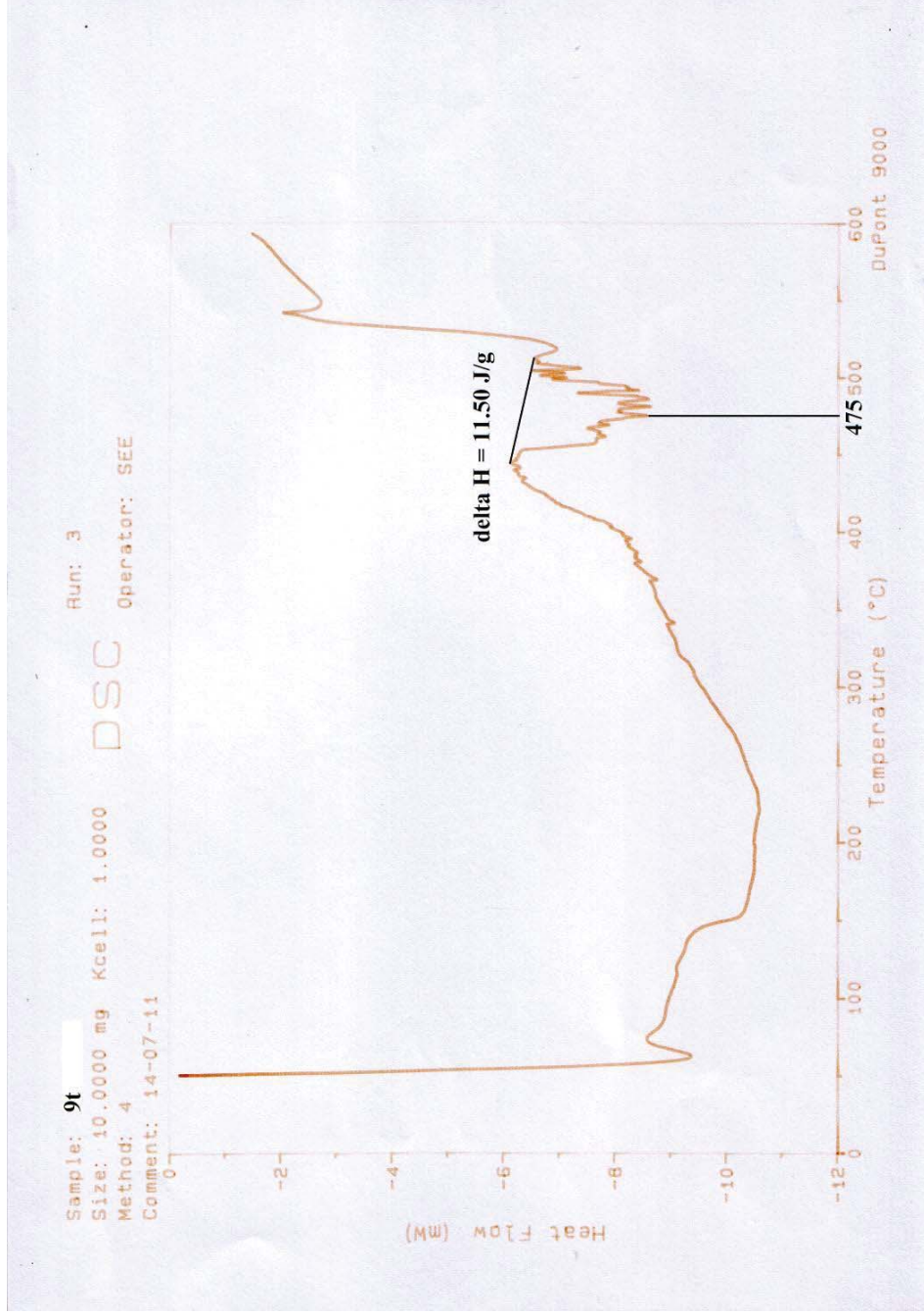
ภาพที่ 71 เทอร์โมแกรม DSC ของเดนส์ไฟไลต์ ตัวอย่าง 6t



ภาพที่ 72 เทอร์โมแกรม DSC ของกรอบพลาสติกของไฟฟ้านำรถ ตัวอย่าง 7t



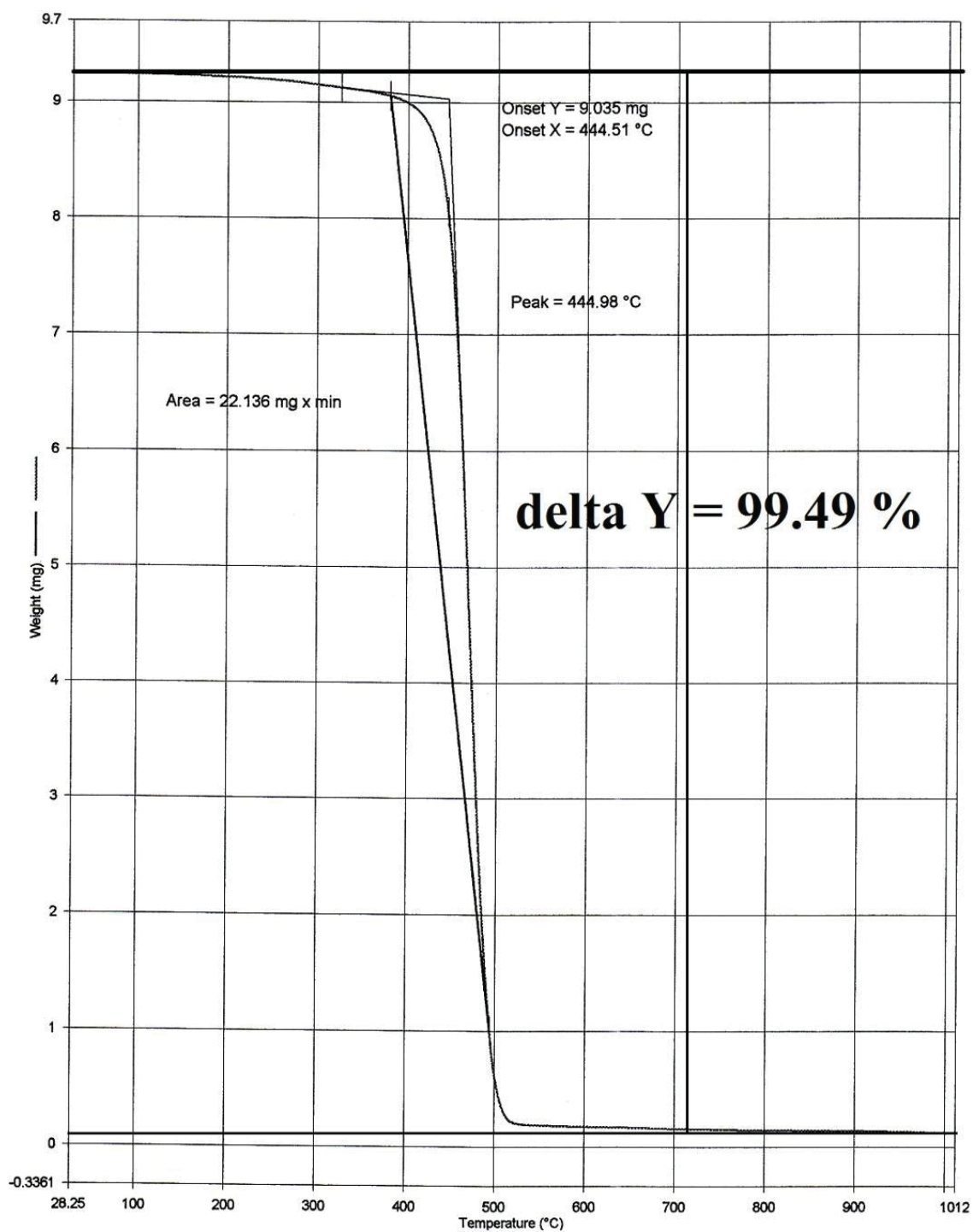
ภาพที่ 73 เทอร์โมแกรม DSC ของโคมไฟหน้า ตัวอย่าง 8t



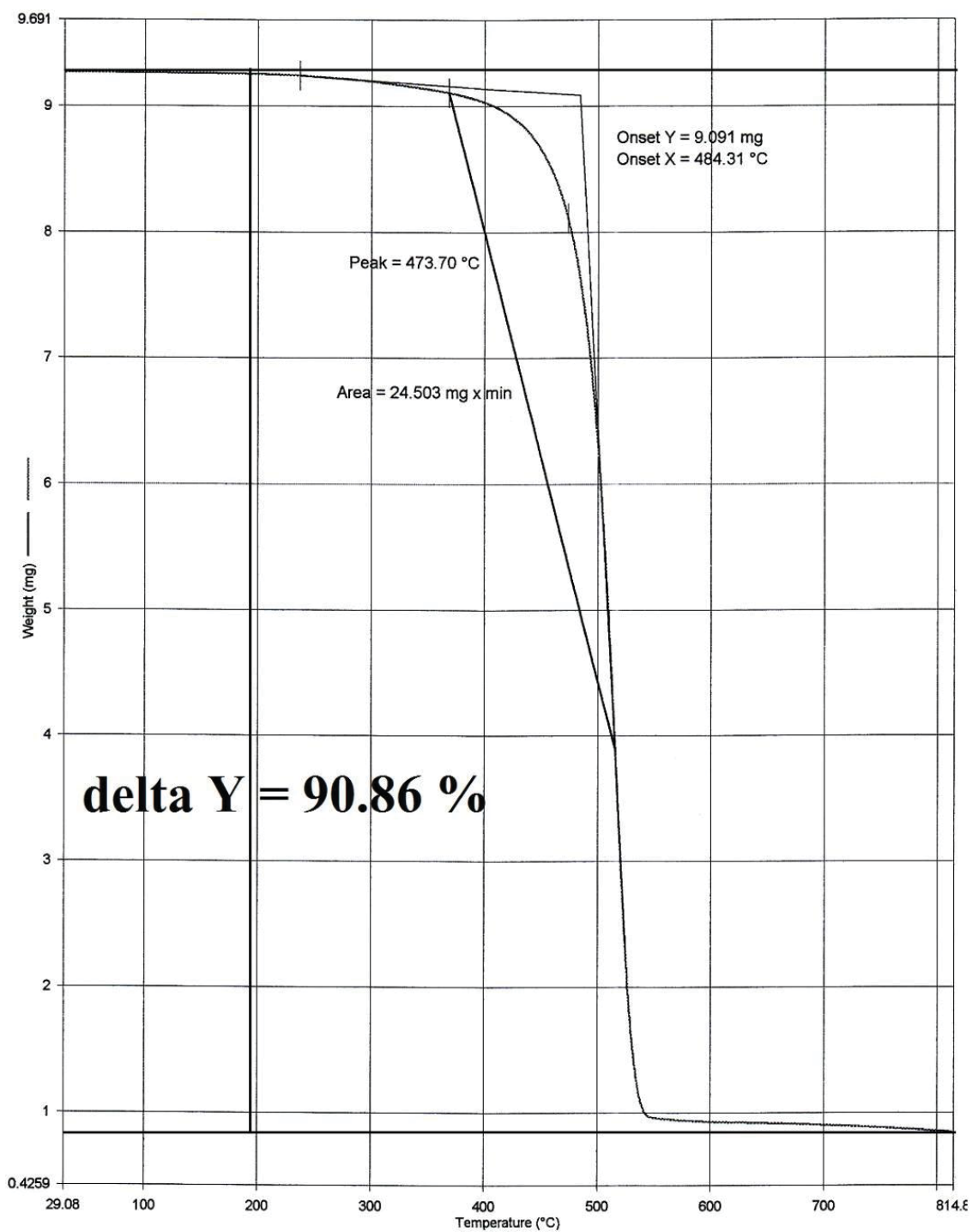
ภาพที่ 74 เทอร์โมแกรม DSC ของเส้นสตีไฟไนลด์ ตัวอย่าง 9t

ภาคผนวก ง

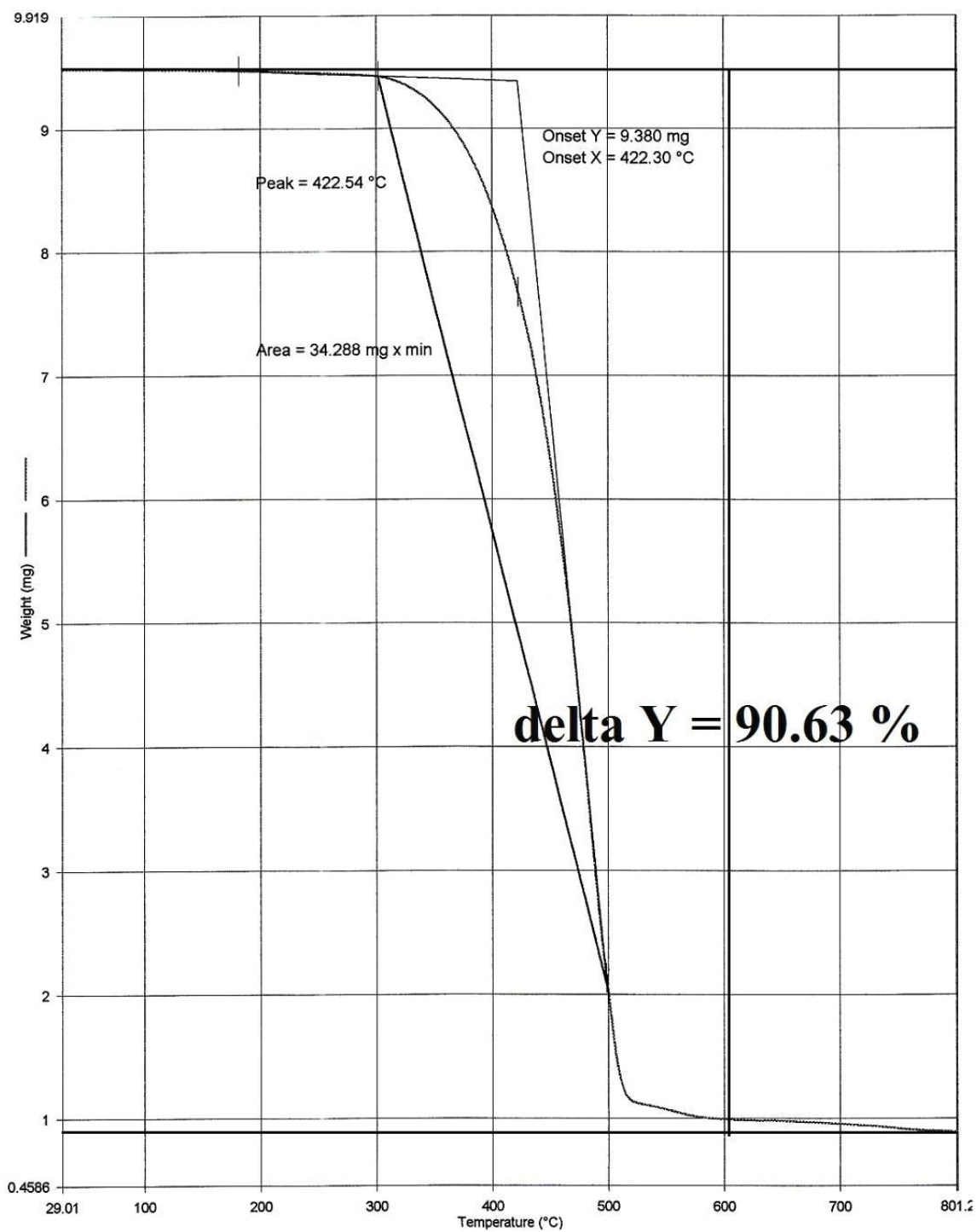
เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค TGA



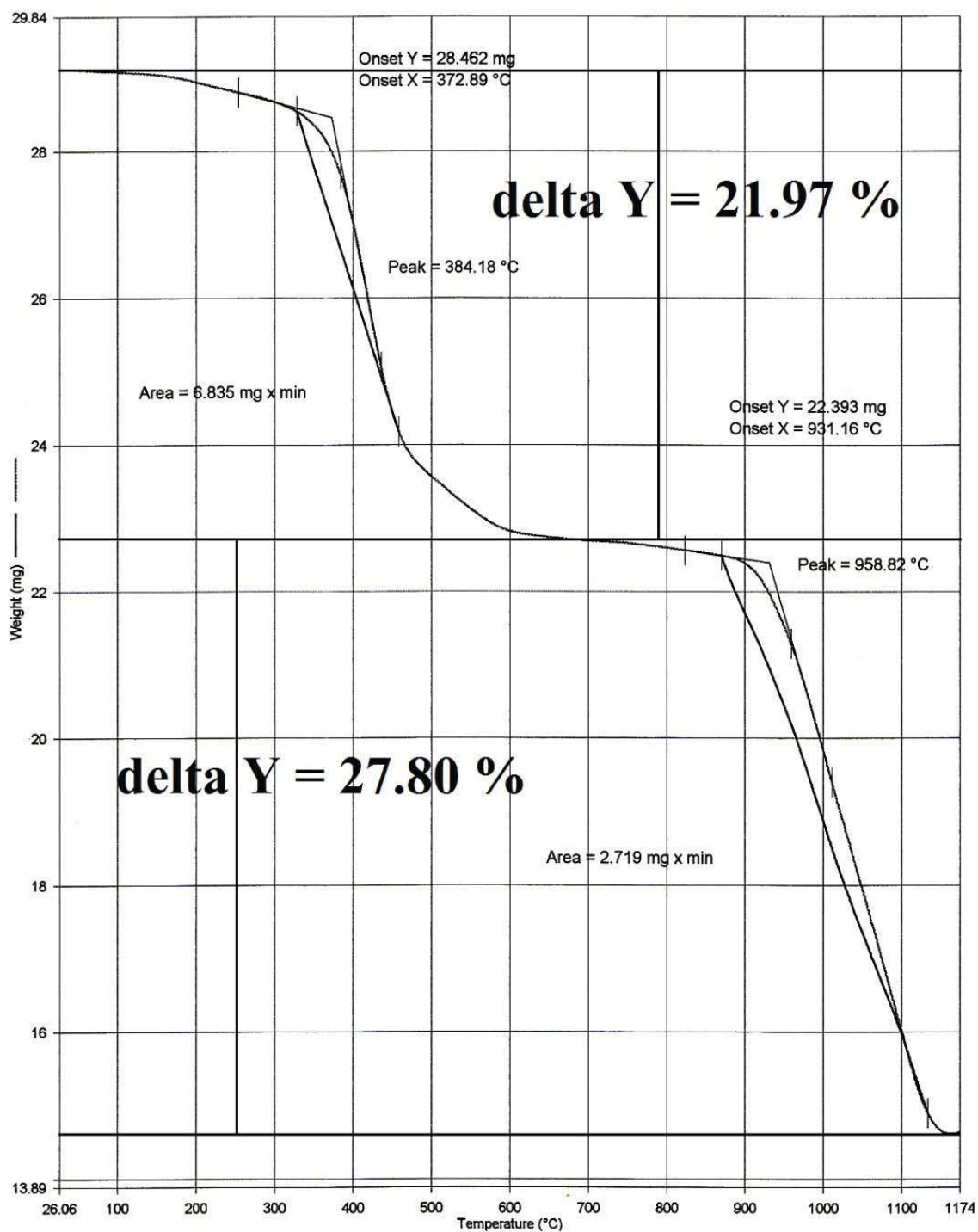
ภาพที่ 75 เทอร์โมแกรม TGA ของชุดแต่งด้านข้างรถ (skirt) ตัวอย่าง 1h



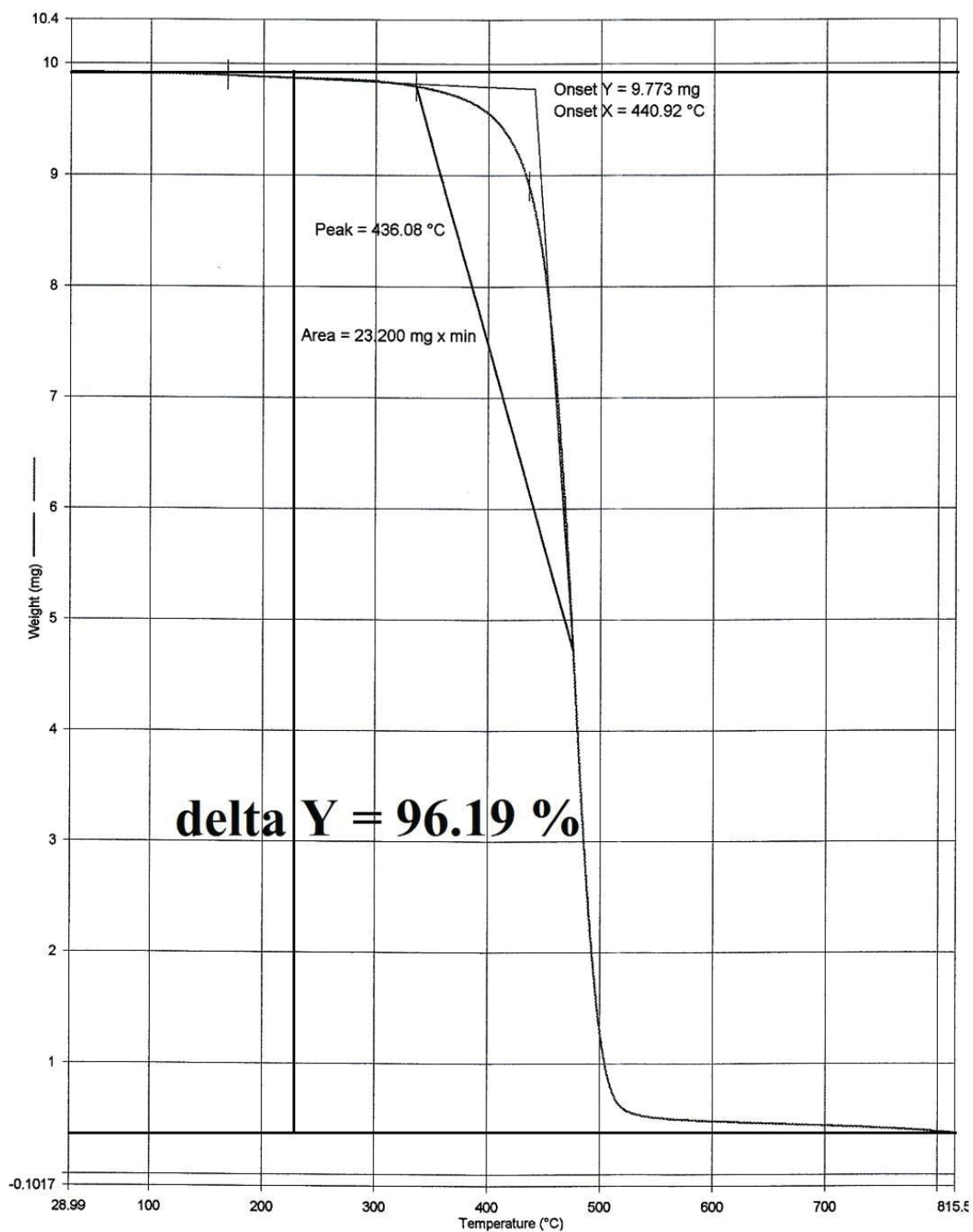
ภาพที่ 76 เทอร์โมแกรม TGA ของกั้นชนหน้ารถ ตัวอย่าง 2h



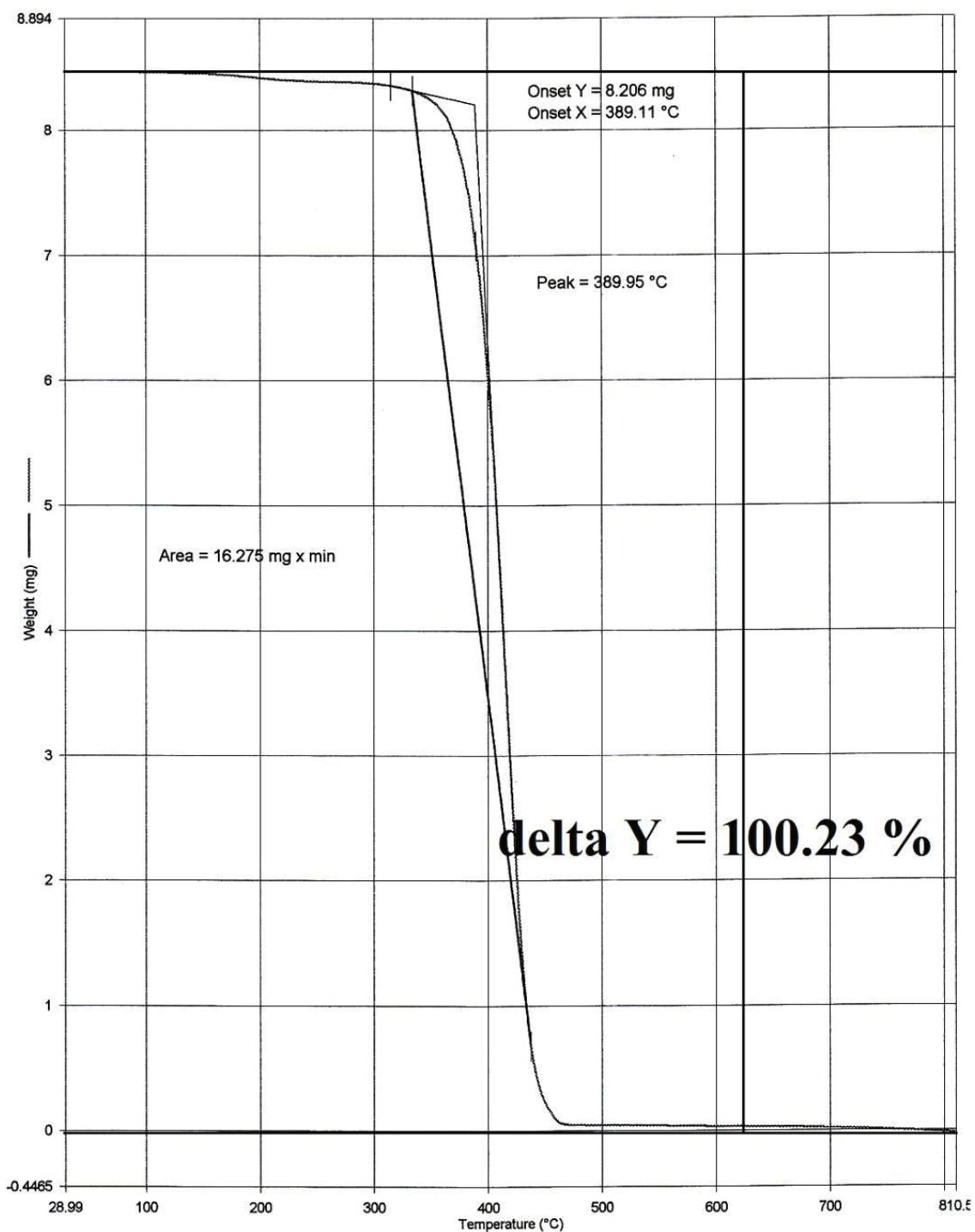
ภาพที่ 77 เทอร์โมแกรม TGA ของกรอบทะเบียนรด ตัวอย่าง 3h



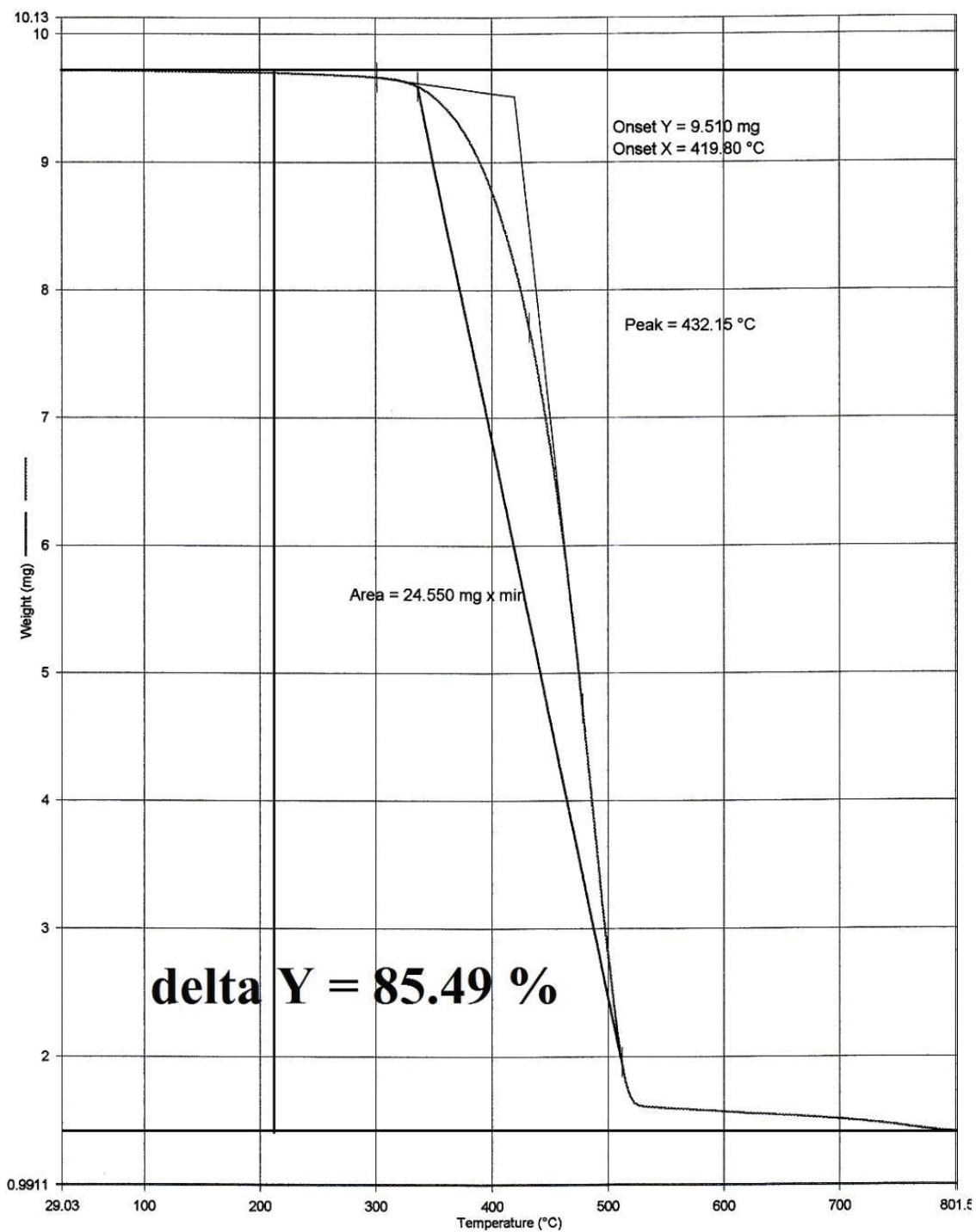
ภาพที่ 78 เทอร์โมแกรม TGA ของโคมไฟหน้า ตัวอย่าง 4h



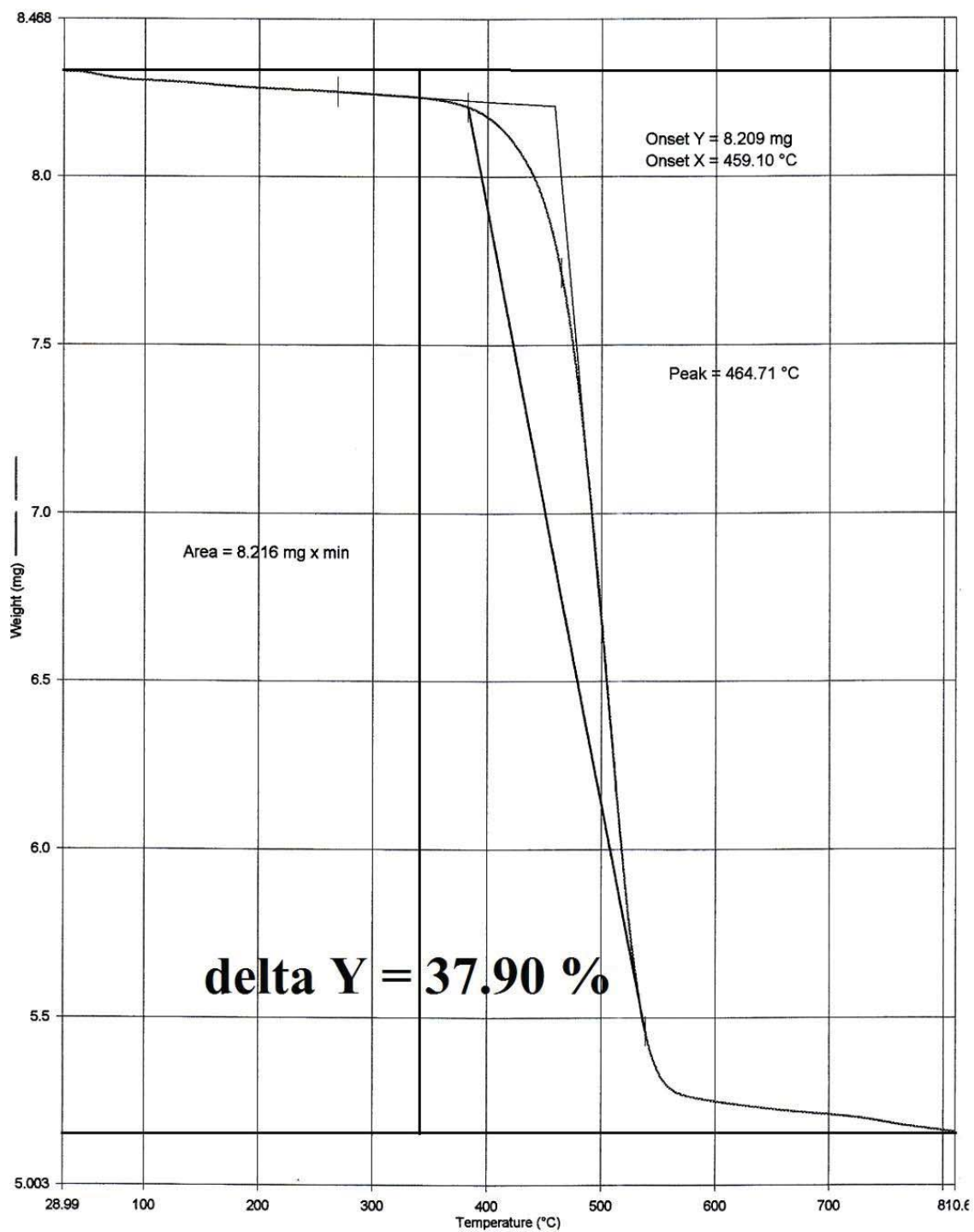
ภาพที่ 79 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกของกระจกมองข้าง ตัวอย่าง 5h



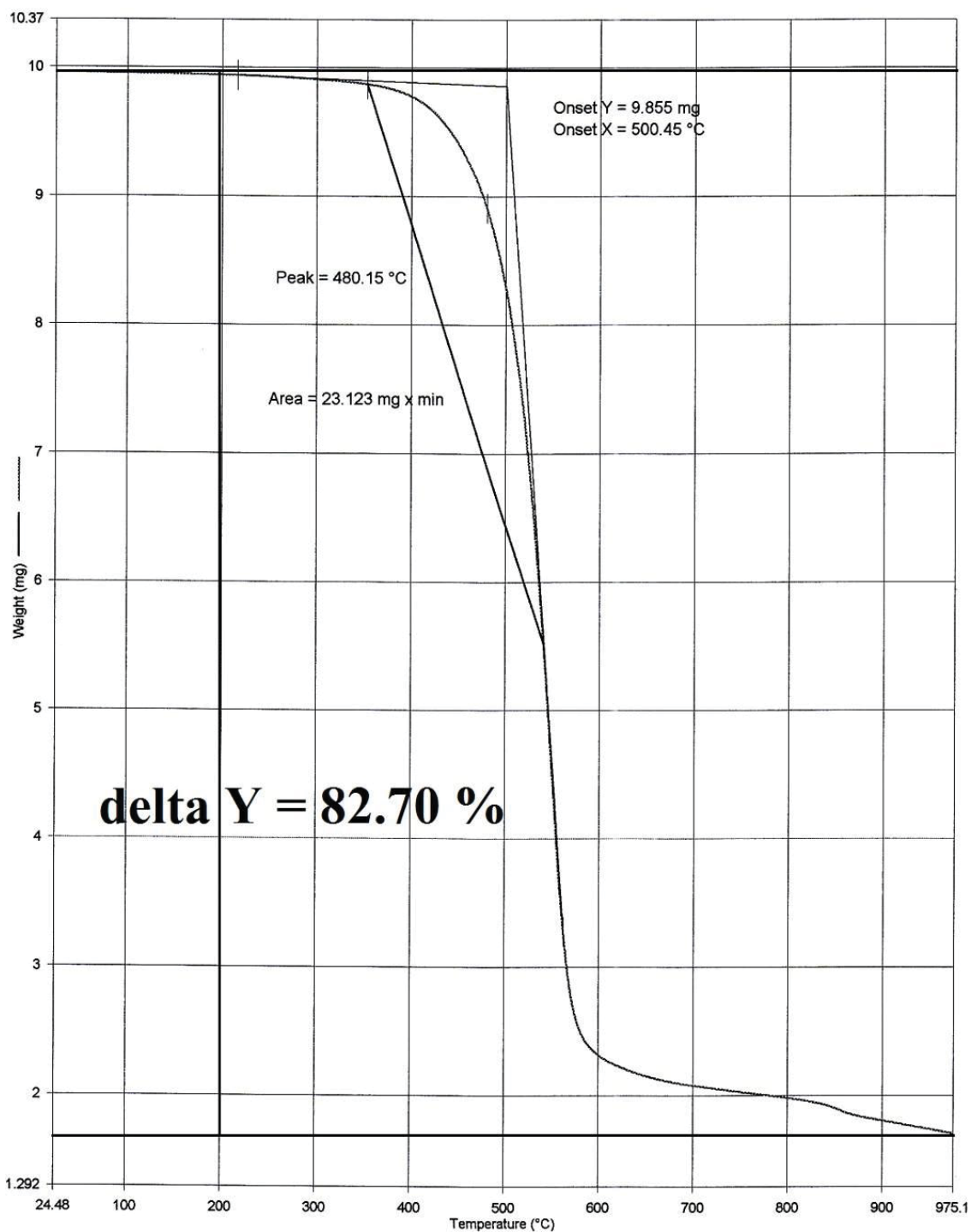
ภาพที่ 80 เทอร์โมแกรม TGA ของเลนส์ไฟเลีย ตัวอย่าง 6h



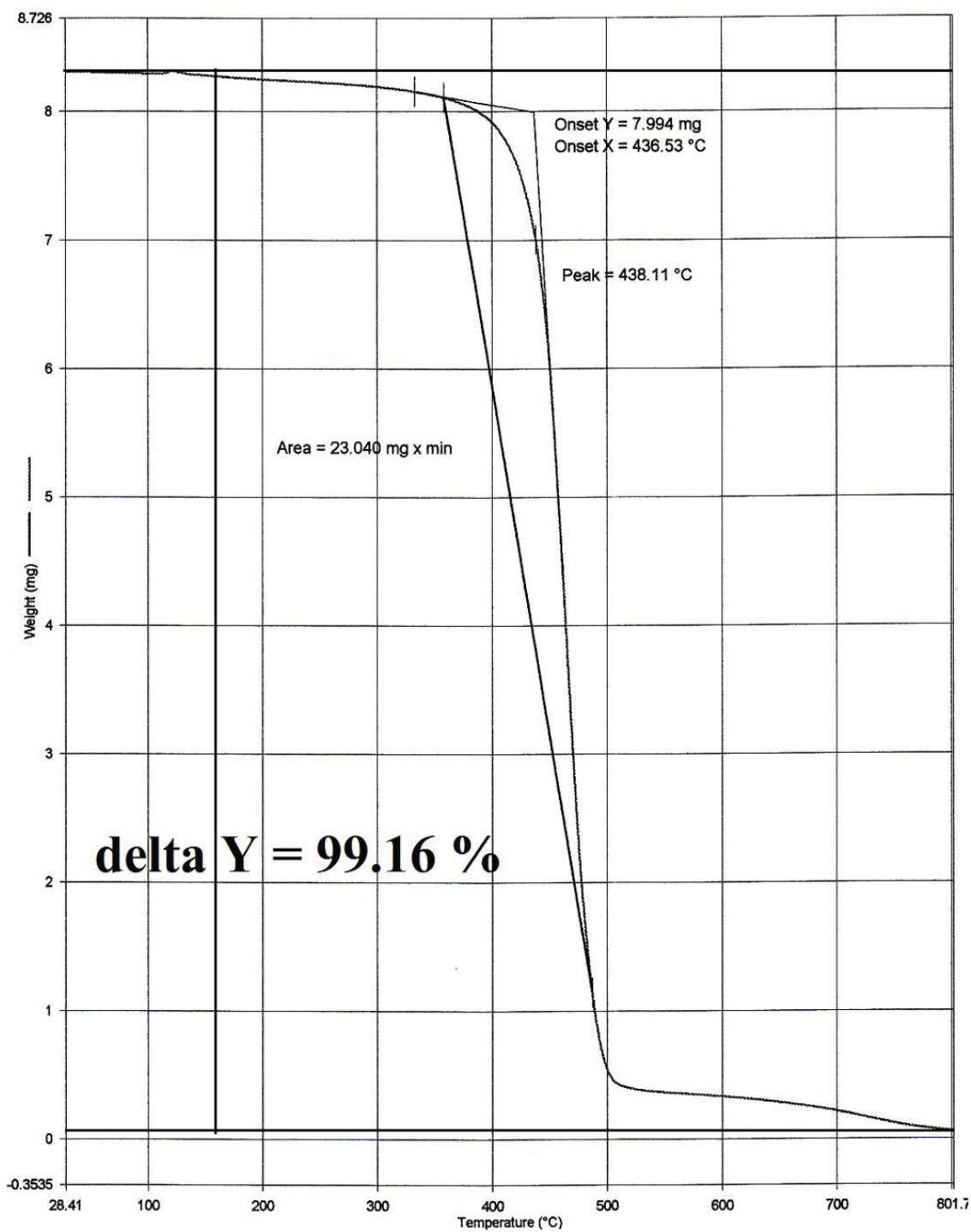
ภาพที่ 81 เทอร์โมแกรม TGA ของกรอบพลาสติกของไฟนัวร์ด ตัวอย่าง 7h



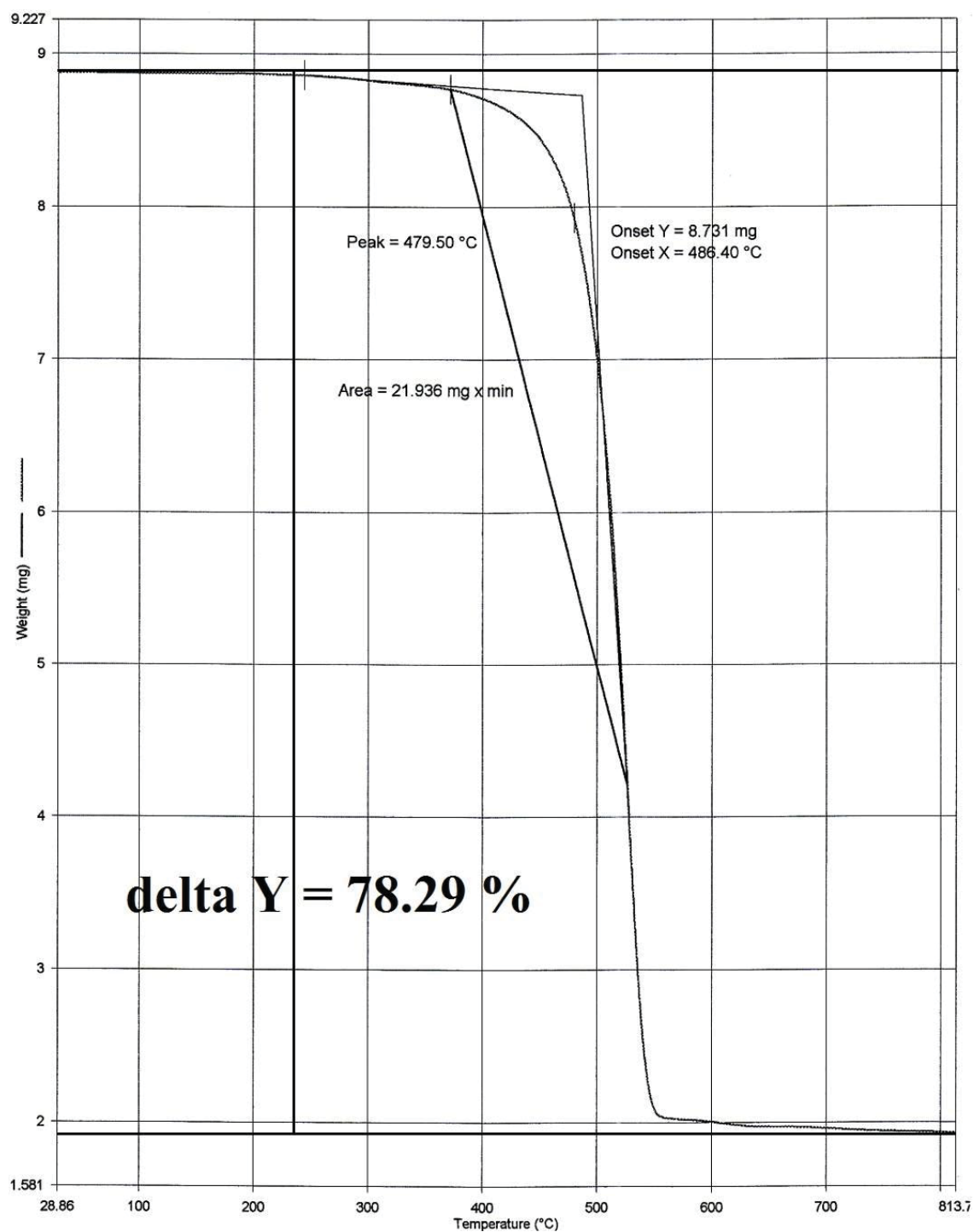
ภาพที่ 82 เทอร์โมแกรม TGA ของแซนไซด์กระจกมองข้าง ตัวอย่าง 8h



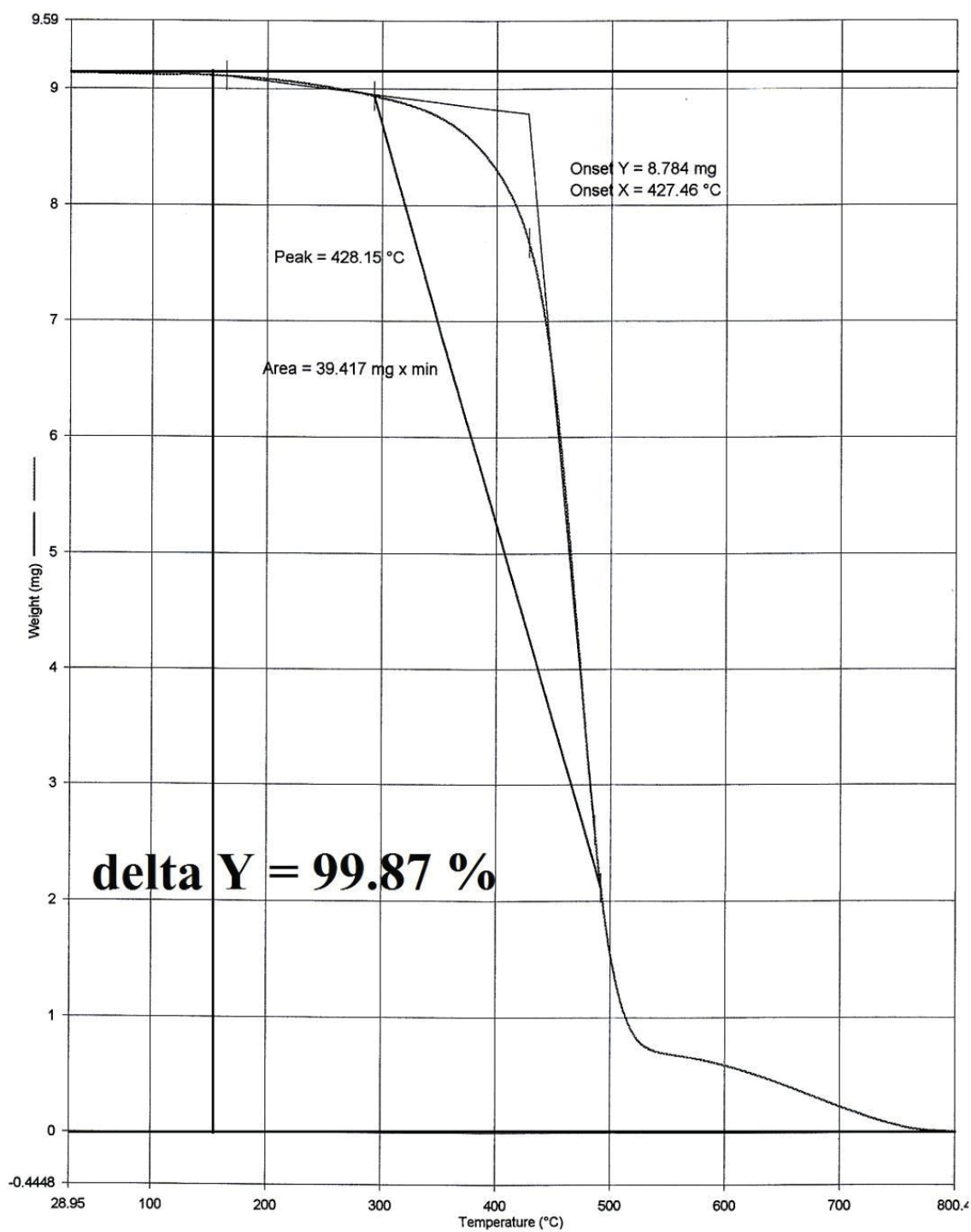
ภาพที่ 83 เทอร์โมแกรม TGA ของเลนส์ไฟหน้ารถ ตัวอย่าง 9h



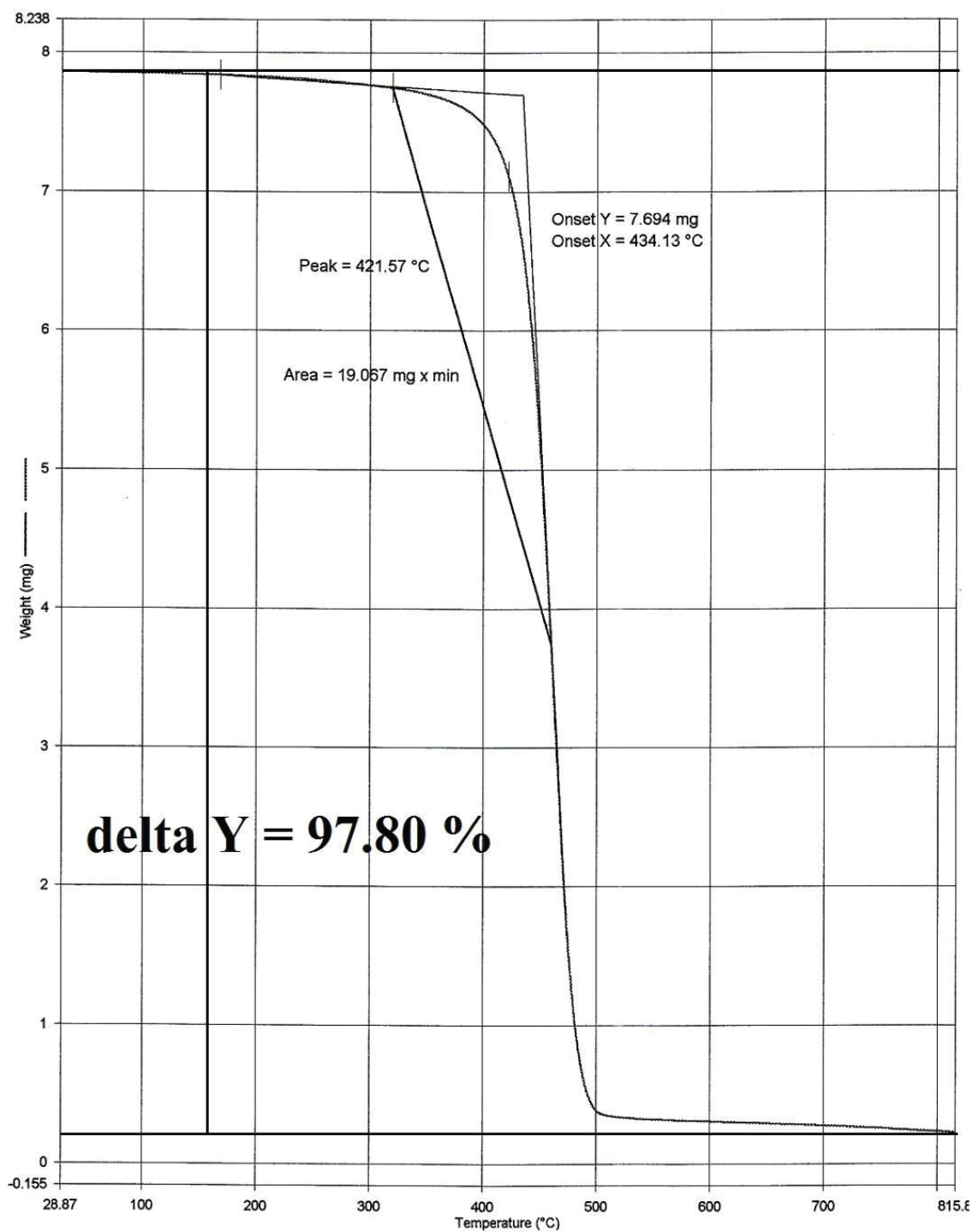
ภาพที่ 84 เทอร์โมแกรม TGA ของกัมมันตภาพรังสีตัวอย่าง 1t



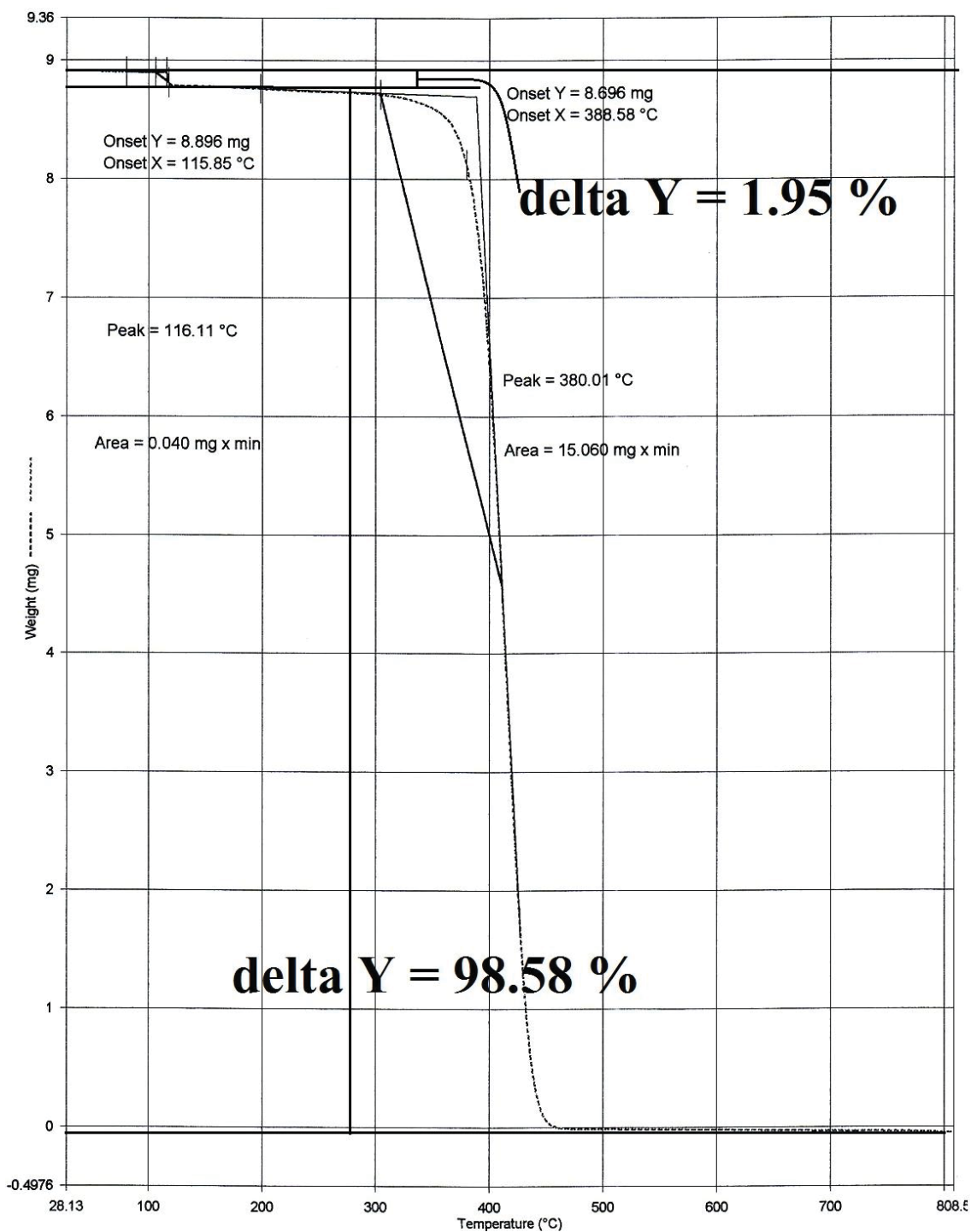
ภาพที่ 85 เทอร์โมแกรม TGA ของกัมมันตภาพรังสีตัวอย่าง 2t



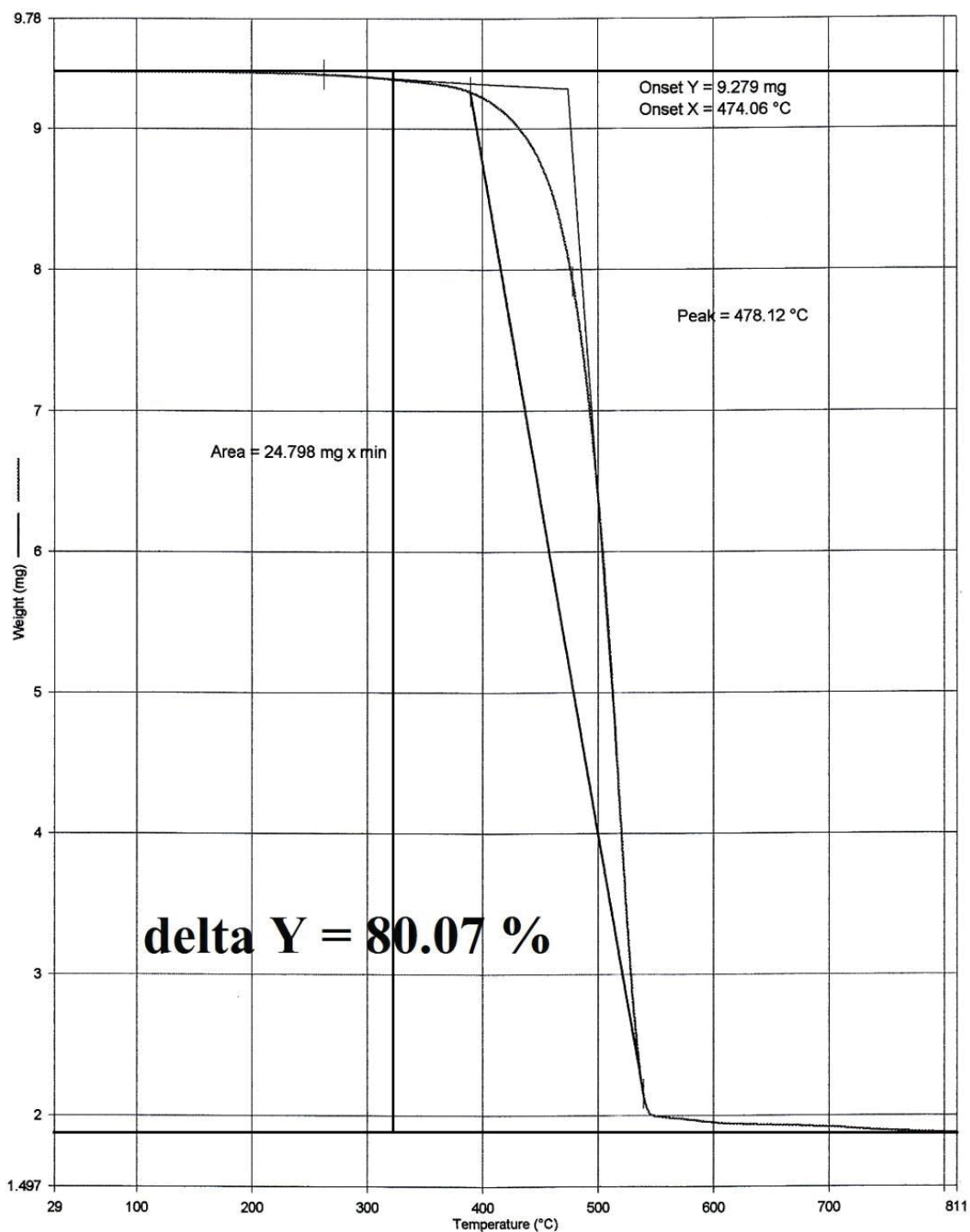
ภาพที่ 86 เทอร์โมแกรม TGA ของกรอบทะเบียนรถ ตัวอย่าง 3t



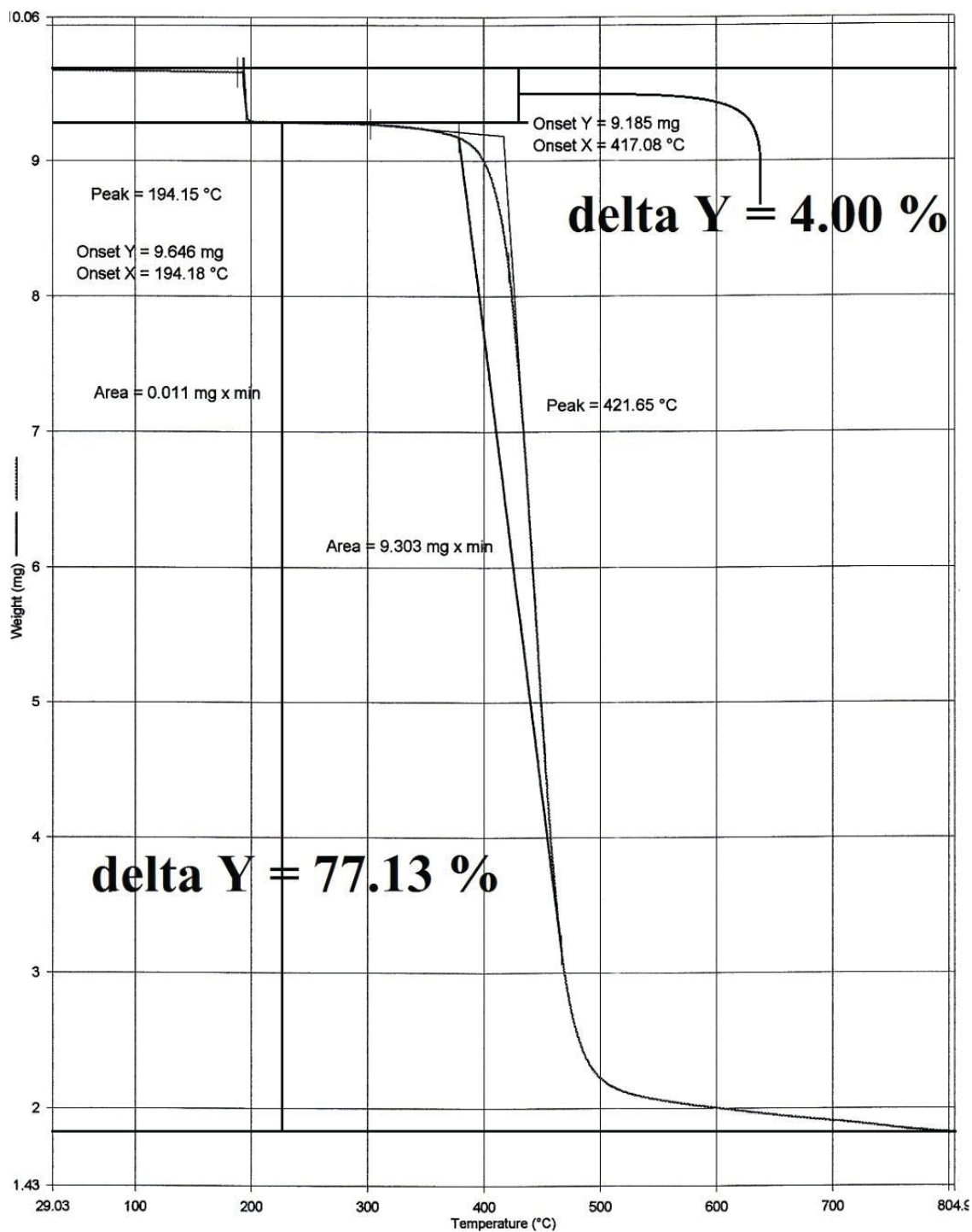
ภาพที่ 87 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกของกระจกมองข้าง ตัวอย่าง 5t



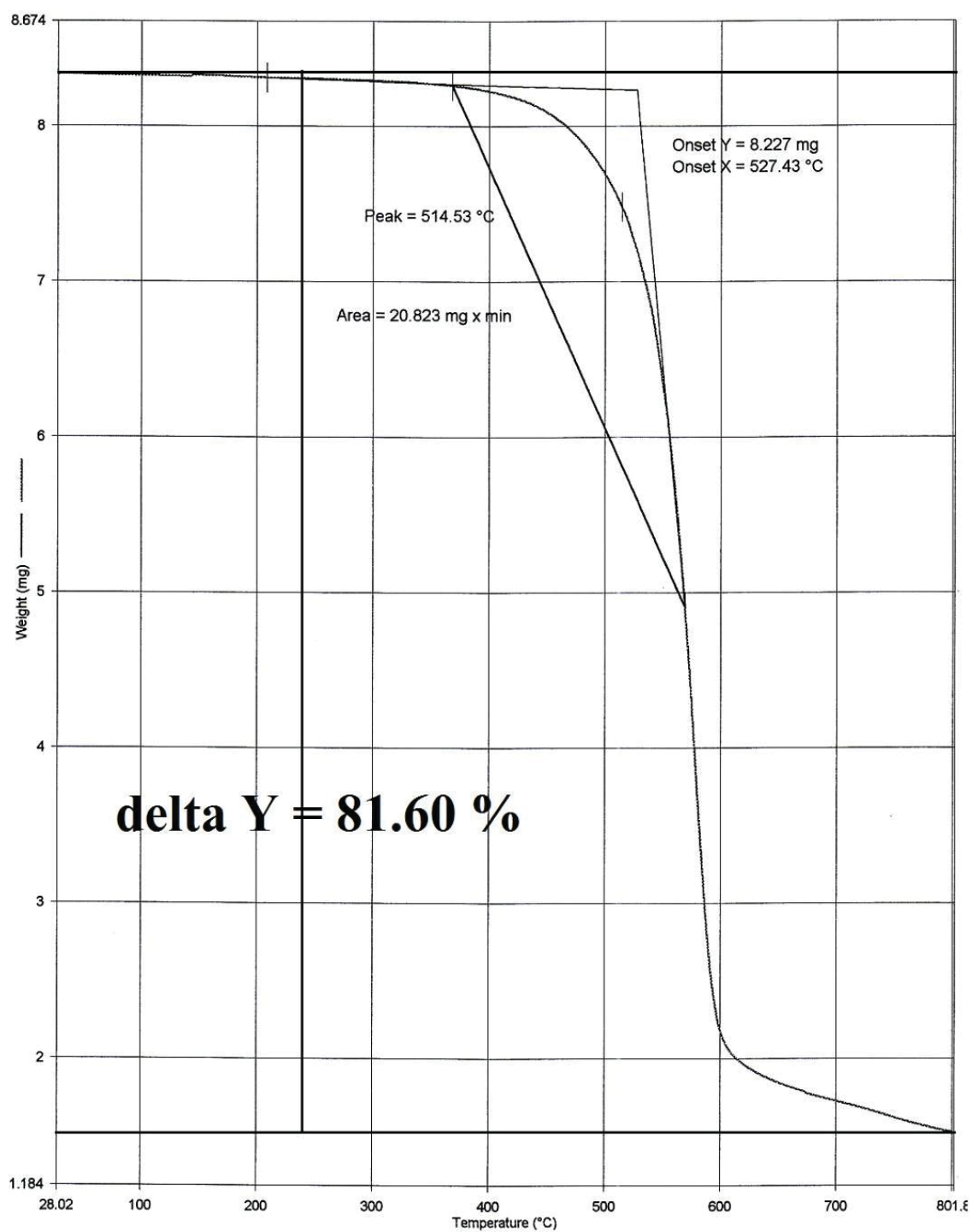
ภาพที่ 88 เทอร์โมแกรม TGA ของเลนส์ไฟเลีย ตัวอย่าง 6t



ภาพที่ 89 เทอร์โมแกรม TGA ของกรอบพลาสติกของไฟหน้ารถ ตัวอย่าง 7t



ภาพที่ 90 เทอร์โมแกรม TGA ของโคมไฟหน้า ตัวอย่าง 8t



ภาพที่ 91 เทอร์โมแกรม TGA ของเลนส์ไฟหน้ารถ ตัวอย่าง 9t

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – ชื่อสกุล	นายกิตติศักดิ์ เสงหิรัญญวงษ์
ที่อยู่	33 ตำบลอุทัยใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดอุทัยธานี 61000
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2547	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยศิลปากร พระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม
พ.ศ. 2550–ปัจจุบัน	ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2548-2550	เจ้าหน้าที่ควบคุมการเดินเครื่องกังหันไอน้ำแรงดันสูง บริษัทไทยพาวเวอร์โอเปอเรชั่น จำกัด จังหวัดฉะเชิงเทรา