



การวิเคราะห์ชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ที่เป็นพลาสติกด้วยเทคนิค TGA และ FTIR

เพื่อประโยชน์ทางนิติวิทยาศาสตร์

โดย

นางสาวพัทธนันท์ สงเดช



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การวิเคราะห์ชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ที่เป็นพลาสติกด้วยเทคนิค TGA และ FTIR  
เพื่อประโยชน์ทางนิติวิทยาศาสตร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

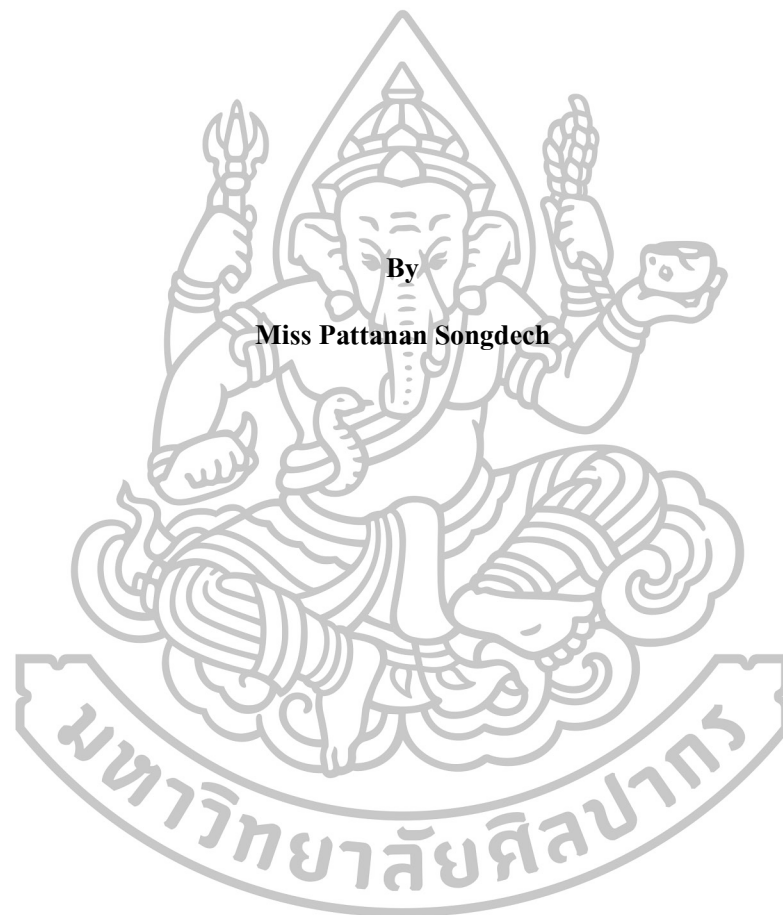
สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**ANALYSIS OF PLASTIC PARTS OF MOTORCYCLE BY TGA AND FTIR  
TECHNIQUES FOR FORENSIC APPLICATION**



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

**Master of Science Program in Forensic Science**

**Graduate School, Silpakorn University**

**Academic Year 2014**

**Copyright of Graduate School, Silpakorn University**

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การวิเคราะห์ชิ้นส่วน  
รถจักรยานยนต์ที่เป็นพลาสติกด้วยเทคนิค TGA และ FTIR เพื่อประโยชน์ทางนิติวิทยาศาสตร์”  
เสนอโดย นางสาวพัชชนันท์ สงเดช เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์

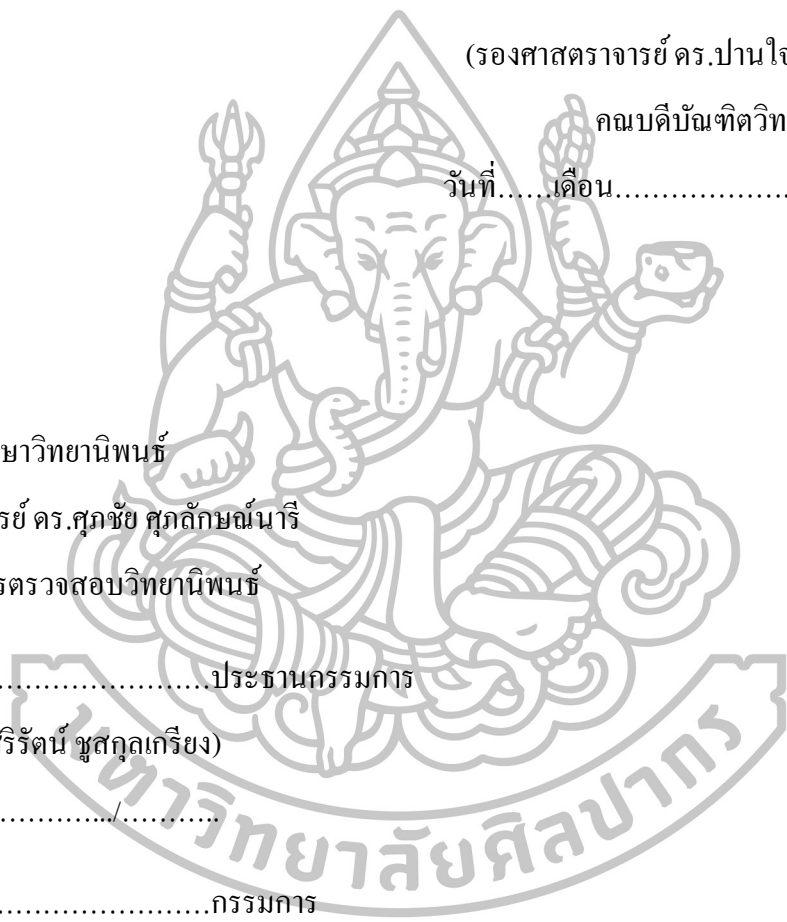
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศน์วงศ์)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
อาจารย์ ดร.ศุภชัย ศุภลักษณ์นารี  
คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง)  
...../...../.....

.....กรรมการ  
(พลตำรวจตรี โสสินทร์ หินเขาวัว)  
...../...../.....

.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ศุภชัย ศุภลักษณ์นารี)  
...../...../.....



55312313: สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์

คำสำคัญ: ชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ / พลาสติก / TGA / FTIR / นิติวิทยาศาสตร์

พัทธนันท์ สงเดช: การวิเคราะห์ชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ที่เป็นพลาสติกด้วยเทคนิค TGA และ FTIR เพื่อประโยชน์ทางนิติวิทยาศาสตร์. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: อ.ดร. สุภชัย สุภลักษณ์วี. 160 หน้า.

ในสถานที่เกิดเหตุที่เกี่ยวข้องกับอุบัติเหตุบนท้องถนน มักมีวัตถุพยานบางอย่างที่สามารถเชื่อมโยงเหตุการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นเข้าด้วยกัน และนำไปสู่การหาข้อเท็จจริงในการเกิดอุบัติเหตุ นั้นได้ จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้ เพื่อวิเคราะห์ชิ้นส่วนพลาสติกของรถจักรยานยนต์ 33 ตัวอย่าง ด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) และ Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) โดยเทคนิคทั้งสองสามารถใช้ในการจำแนกและระบุชนิดของพลาสติกได้ ผลการทดลองด้วยเทคนิค TGA พบการเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมแกรมมีเพียงขั้นตอนเดียว ซึ่งเกิดในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 350-500 °C สามารถจำแนกการเปลี่ยนแปลงได้ 3 กลุ่ม ตามค่าอุณหภูมิเริ่มต้น-สุดท้ายของการเปลี่ยนแปลงมวล (Onset-End Temperature) ดังนี้ โดยกลุ่มที่หนึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 419-472 °C กลุ่มที่สองอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 382-455 °C และกลุ่มสุดท้ายอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 316-392 °C ตามลำดับ ส่วนผลการทดลองด้วยเทคนิค FTIR สามารถจัดจำแนกได้ตามหมู่ฟังก์ชันได้ 3 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มที่หนึ่ง เป็นพลาสติกที่อาจจะทำมาจาก Polypropylene (PP) ได้แก่ พลาสติกบังโคลนหลัง และพลาสติกใต้ เครื่อง ส่วนกลุ่มที่สอง เป็นพลาสติกที่อาจจะทำมาจาก Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) ได้แก่ พลาสติกครอบตัวถัง บังลมหน้า บังโคลนหน้า และครอบแตร ส่วนกลุ่มที่สาม เป็นพลาสติกที่อาจจะทำ มาจาก Polycarbonate (PC) ได้แก่ พลาสติกครอบเรือน วัตรอบ ไฟเลี้ยว และโคมไฟ ทั้งสองเทคนิคที่ใช้ ในการศึกษาครั้งนี้เป็นวิธีที่สะดวกสำหรับการตรวจสอบทางนิติวิทยาศาสตร์ของชิ้นส่วน รถจักรยานยนต์ที่เกิดอุบัติเหตุ

สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์.....

55312313: MAJOR: FORENSIC SCIENCE

KEY WORD: PLASTIC PARTS / MOTORCYCLE / TGA / FTIR / FORENSIC

PATTANAN SONGDECH: ANALYSIS OF PLASTIC PARTS OF MOTORCYCLE BY TGA AND FTIR TECHNIQUES FOR FORENSIC APPLICATION. THESIS ADVISOR: SUPACHAI SUPALUKNARI, Ph.D. 160 pp.

In the road accidents inverting a motorcycle, plastic parts of the vehicle were commonly found at the scene of the incident. Identification of the parts may provide an useful information that can help case investigation. In this work, 33 samples of motorcycle parts were investigated by the techniques of Thermogravimetric analysis (TGA) and Fourier transform infrared (FTIR). The TGA of the samples studied displayed only one profile of the mass change in the temperature range of 350-500 °C. The onset and end temperatures of the TGA profile were used to categorize the samples into three groups. The first group was for samples that displayed the mass change in the temperature range of 419-472 °C. The second group of samples had the TGA profile in the 382-455 °C range while for the last group the mass change was observed in the range of 316-392 °C. The functional groups observed in the FTIR spectra were used to identify the type of plastic. The parts that can be identified as polypropylene are the rear mud guard and the undertray. The side panels, the windscreen, the front fender and the horn cover were identified as acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) while the covers of the odometer, the turn light and the head light were made from polycarbonate. The two techniques used in this study are convenient methods for the characterization of motorcycle parts recovered for accident on forensic investigation.

---

Program of forensic science

Graduate School, Silpakorn University

Student's signature .....

Academic Year 2014

Thesis Advisors' signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง การวิเคราะห์ชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ที่เป็นพลาสติกด้วยเทคนิค TGA และ FTIR เพื่อประโยชน์ทางนิติวิทยาศาสตร์ สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากการสนับสนุน และให้ความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณทั้งหลายเป็นอย่างดี

ผู้ทำวิจัยขอขอบพระคุณ อ.ดร.ศุภชัย สุภลักษณ์นารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ขอขอบพระคุณ อ.ดร.ศิริรัตน์ ชุสกุลเกรียง ที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำ ให้คำปรึกษาเมื่อเกิดปัญหาในการทำงานวิจัย ตลอดจนแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ ตลอดระยะเวลาที่ทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณ พล.ต.ต.โกสินทร์ หินเขาว์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิเป็นอย่างสูง ที่คอยแนะนำแนวทางการทำวิจัยในแง่นิติวิทยาศาสตร์ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบริษัท ฮอนด้า ออโตโมบิล (ประเทศไทย) จำกัด บริษัท ไทยยนตร์มอเตอร์ จำกัด และห้างหุ้นส่วนจำกัด พัทลุงชูชุกิ

ขอขอบคุณพระคุณ พ.ต.ท.สุรเวช การวัฒนาศิริกุล รองผู้กำกับการสืบสวน สถานีตำรวจนครบาลท่าข้าม ที่คอยให้ความช่วยเหลือและประสานงานพนักงานสอบสวนเป็นอย่างดี และขอขอบคุณ ร.ต.ท.สุรพงศ์ ตั้งเจริญ เจ้าหน้าที่งานจราจร สน. ท่าข้าม ด.ต.(ญ)กุลภัสสรณ์ นิลสุวรรณ เจ้าหน้าที่งานจราจร สน. บางรัก และ ร.ต.ต.ธนัช วงศ์ปัดติ เจ้าหน้าที่งานธุรการคดี สน. กระทบเบน ที่สนับสนุนข้อมูลการเกิดอุบัติเหตุจราจรทางบกเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณพี่ๆเจ้าหน้าที่ทุกๆท่านที่ช่วยสอนวิธีการใช้เครื่อง TGA และ FTIR รวมทั้งให้คำปรึกษาในการยื่นเอกสาร จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ คุณตา คุณยาย และญาติพี่น้องทุกท่าน ที่คอยเป็นกำลังใจตั้งแต่ต้นจนจบ หากไม่มีคุณแม่ผู้ทำวิจัยคงไม่มีวันนี้ ขอขอบคุณที่คอยสนับสนุนทุกอย่างในชีวิต

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ สาขานิติวิทยาศาสตร์รุ่น 8 ที่คอยให้คำแนะนำ แบ่งปันประสบการณ์ดีๆ ตลอดระยะเวลา 2 ปี

## สารบัญ

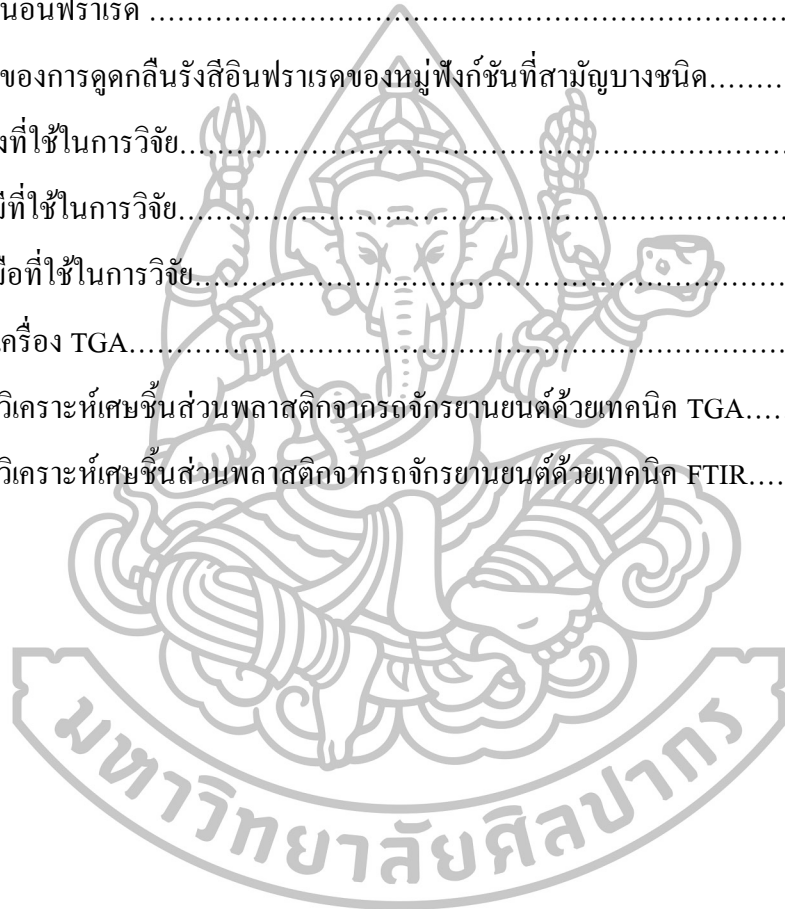
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
สมมติฐานของการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
ขั้นตอนการวิจัย.....	3
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	4
2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	5
พลาสติก.....	5
หลักการของเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) .....	35
หลักการของเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR).....	45
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	52
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	55
วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	55
ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย.....	55



บทที่	หน้า
สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	62
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	62
วิธีการวิจัย.....	65
การเตรียมตัวอย่างพลาสติก.....	65
การวิเคราะห์เศษชิ้นส่วนพลาสติกด้วยเครื่อง TGA.....	66
การวิเคราะห์เศษชิ้นส่วนพลาสติกด้วยเครื่อง FTIR.....	66
4 ผลการวิจัย.....	68
การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค TGA.....	68
การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค FTIR.....	73
5 บทสรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	77
สรุปและอภิปรายผล.....	77
ข้อเสนอแนะ.....	85
รายการอ้างอิง.....	86
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค TGA.....	92
ภาคผนวก ข สเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค FTIR.....	126
ประวัติผู้วิจัย.....	160

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	จุดคูร์ที่ใช้ปรับมาตรฐานของสารตัวอย่างใน TG.....	44
2	ตัวอย่างของวัสดุที่ใช้ทำ window cells สำหรับเทคนิค FTIR.....	46
3	ช่วงคลื่นอินฟราเรด .....	48
4	ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันที่สามัญบางชนิด.....	51
5	ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย.....	55
6	สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	62
7	เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	62
8	การตั้งเครื่อง TGA.....	66
9	ผลการวิเคราะห์เศษชิ้นส่วนพลาสติกจากรถจักรยานยนต์ด้วยเทคนิค TGA.....	71
10	ผลการวิเคราะห์เศษชิ้นส่วนพลาสติกจากรถจักรยานยนต์ด้วยเทคนิค FTIR.....	75



## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การเตรียมไมลอน 6,6.....	6
2	พอลิไธรีน.....	7
3	ลักษณะ โครงสร้างของ LDPE .....	12
4	พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride), PVC).....	15
5	พอลิเมทิลเมทาคริเลท (Poly(methyl methacrylate), PMMA).....	18
6	พอลิไวนิลอะซิเตท (Poly(vinyl acetate), PVAC) .....	19
7	อะรามิด (Aramids) .....	20
8	โนแมกซ์ (Nomex) .....	21
9	พอลิออกซีเมทิลีน (Polyoxymethylene, POM) .....	22
10	พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) .....	25
11	พอลิตetraฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) .....	27
12	พอลิเฮกซะฟลูออโรโพรไพลีน (Polyhexafluoropropylene, PHFP) .....	27
13	ฟลูออริเนเตด เอทิลีน โพรไพลีน (Fluorinated ethylene propylene (FEP) copolymer)...	27
14	เพอร์ฟลูออโรอัลคอกซี (Perfluoroalkoxy (PFA)) .....	28
15	พอลิฟีนีลีนออกไซด์ (Polyphenyleneoxide, PPO).....	29
16	พอลิฟีนีลีนซัลไฟด์ (Polyphenylenesulfide, PPS) .....	30
17	พอลิอีเทอร์คีโตน (Polyetherketone, PAEK) และพอลิอีเทอร์คีโตน (Polyether etherketone, PEEK).....	31
18	พอลิอีเทอร์คีโตนอีเทอร์คีโตนคีโตน (Polyetherketoneetherketoneketone, PEKEKK)..	31
19	พอลิซันโฟน (Polysulfone, PSU) .....	32
20	Udel .....	33
21	พอลิอีเทอร์ซันโฟน (Polyethersulfone, PES) .....	33

ภาพที่	หน้า
22 พอลิอิมิด (Polyimide, PI).....	34
23 พอลิเอไมด์อิมิด (Polyamideimide, PAI) .....	35
24 พอลิเอเทอร์อิมิด (Polyetherimide, PEI) .....	35
25 ลักษณะเส้นเคิร์ฟของ TG (เส้นทึบ) และ DTG (เส้นประ) .....	36
26 แผนภาพไดอะแกรมของระบบเครื่องชั่งความร้อน .....	37
27 แผนภาพแสดง microbalance : A, lamp; B, Shutter; C, Photocells .....	38
28 การจัดเรียงเครื่องชั่งความร้อนที่แสดงถึงเตาเผา (ทึบแสง) ตำแหน่งสารตัวอย่างและ ที่วางสาร: (a) และ (c) เป็นแบบแขวน; (b) เป็นแบบตั้งขึ้น; (d) เป็นแบบแนวนอน ตำแหน่งแม่เหล็กสำหรับปรับมาตรฐานที่จุดคูรีแสดงในรูป (c) .....	38
29 ไดอะแกรมแสดงเครื่องชั่งความร้อนขนาดเล็กๆ แบบสมมาตร .....	40
30 ไดอะแกรมของเครื่องชั่งความร้อนขนาดเล็กๆ ที่แขวนในสนามแม่เหล็ก .....	41
31 เส้นเคิร์ฟแสดงจุดคูรีที่ได้จากการจัดเรียงอุปกรณ์ในภาพที่ 28 เมื่อเลือกใช้โลหะนิกเกิล จะให้ค่า $T_1$ 351.4 °C; $T_2$ 352.8 °C; $T_3$ 354.4 °C $T_2$ คือค่าใช้ปรับมาตรฐาน ณ จุดคูรี	43
32 แสดงการทำงานของ interferometer .....	46
33 การแทรกสอดของลำแสงที่สะท้อนกลับในกรณีที่เป็นแสงความถี่เดียวและแสง polychromatic .....	47
34 แสดงชนิดการสั่นแบบยืดและแบบงอ.....	50
35 แผนผังการทดลองในงานวิจัย .....	67
36 เทอร์โมแกรมของตัวอย่างพลาสติกบั้งโคลนหลัง Honda-RT ด้วยเทคนิค TGA.....	68
37 เทอร์โมแกรมของตัวอย่างพลาสติกครอบตัวถัง Honda-BB ด้วยเทคนิค TGA.....	69
38 เทอร์โมแกรมของตัวอย่างพลาสติกไฟเลียวหลัง Honda-LT ด้วยเทคนิค TGA.....	70
39 สเปกตรัมของตัวอย่างพลาสติกบั้งโคลนหลัง Honda-RT ด้วยเทคนิค FTIR.....	73

ภาพที่	หน้า
40	สเปกตรัมของตัวอย่างพลาสติกกรอบตัวถัง Honda-BB ด้วยเทคนิค FTIR..... 74
41	สเปกตรัมของตัวอย่างพลาสติกไฟเลียหลัง Honda-LT ด้วยเทคนิค FTIR..... 74
42	แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ของตัวอย่างไฟเลียหน้า Honda-LH Suzuki-LH และ Yamaha-LH ตามลำดับ..... 79
43	แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ของตัวอย่างบังโคลนหน้า Honda-RH Suzuki-RH และ Yamaha-RH ตามลำดับ..... 80
44	แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ของตัวอย่างโคมไฟหน้า Honda-LampH Suzuki-LampH และ Yamaha-LampH ตามลำดับ..... 81
45	แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ของตัวอย่างโคมไฟหน้า Honda-LT Suzuki-LT และ Yamaha-LT ตามลำดับ..... 82
46	แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ของตัวอย่างโคมไฟหน้า Honda-LampT Suzuki-LampT และ Yamaha-LampT ตามลำดับ..... 83
47	แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ของตัวอย่างโคมไฟหน้า Honda-RT Suzuki-RT และ Yamaha-RT ตามลำดับ..... 84
48	เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกกรอบแคป HONDA-Hcover ..... 93
49	เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกบังลมหน้า HONDA-WH..... 94
50	เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกบังโคลนหน้า HONDA-RH ..... 95
51	เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกโคมไฟหน้า HONDA-LampH ..... 96
52	เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกไฟเลียหน้า HONDA-LH ..... 97
53	เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกไฟเลียหลัง HONDA-LT..... 98
54	เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกใต้เครื่องยนต์ HONDA-Under ..... 99
55	เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกบังโคลนหลัง HONDA-RT ..... 100

ภาพที่	หน้า
56 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกครอบตัวถัง HONDA-BB.....	101
57 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกครอบเรือนวัตรอบ HONDA-Mcover.....	102
58 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกโคมไฟหลัง HONDA-LampT.....	103
59 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกครอบแตร SUZUKI-Hcover.....	104
60 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกบังลมหน้า SUZUKI –WH.....	105
61 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกบังโคลนหน้า SUZUKI-RH.....	106
62 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกโคมไฟหน้า SUZUKI-LampH.....	107
63 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกไฟเลี้ยวหน้า SUZUKI-LH.....	108
64 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกไฟเลี้ยวหลัง SUZUKI-LT.....	109
65 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกใต้เครื่องยนต์ SUZUKI-Under.....	110
66 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกบังโคลนหลัง SUZUKI-RT.....	111
67 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกครอบตัวถัง SUZUKI-BB.....	112
68 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกครอบเรือนวัตรอบ SUZUKI-Mcover.....	113
69 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกโคมไฟหลัง SUZUKI-LampT.....	114
70 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกครอบแตร YAMAHA-Hcover.....	115
71 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกบังลมหน้า YAMAHA –WH.....	116
72 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกบังโคลนหน้า YAMAHA-RH.....	117
73 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกโคมไฟหน้า YAMAHA-LampH.....	118
74 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกไฟเลี้ยวหน้า YAMAHA-LH.....	119
75 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกไฟเลี้ยวหลัง YAMAHA-LT.....	120
76 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกใต้เครื่องยนต์ YAMAHA-Under.....	121
77 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกบังโคลนหลัง YAMAHA-RT.....	122

ภาพที่	หน้า
78 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกครอบตัวถัง YAMAHA-BB.....	123
79 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกครอบเรือนวัตรอบ YAMAHA-Mcover.....	124
80 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกโคมไฟหลัง YAMAHA-LampT.....	125
81 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกครอบแตร HONDA-HCOVER.....	127
82 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกบังลมหน้า HONDA-WH.....	128
83 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกบังโคลนหน้า HONDA-RH.....	129
84 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกโคมไฟหน้า HONDA-LampH.....	130
85 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกไฟเลี้ยวหน้า HONDA-LH.....	131
86 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกไฟเลี้ยวหลัง HONDA-LT.....	132
87 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกใต้เครื่องยนต์ HONDA-Under.....	133
88 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกบังโคลนหลัง HONDA-RT.....	134
89 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกครอบตัวถัง HONDA-BB.....	135
90 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกครอบเรือนวัตรอบ HONDA-Mcover.....	136
91 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกโคมไฟหลัง HONDA-LampT.....	137
92 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกครอบแตร SUZUKI-Hcover.....	138
93 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกบังลมหน้า SUZUKI –WH.....	139
94 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกบังโคลนหน้า SUZUKI-RH.....	140
95 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกโคมไฟหน้า SUZUKI-LampH.....	141
96 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกไฟเลี้ยวหน้า SUZUKI-LH.....	142
97 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกใต้เครื่องยนต์ SUZUKI-Under.....	143
98 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกไฟเลี้ยวหลัง SUZUKI-LT.....	144
99 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกบังโคลนหลัง SUZUKI-RT.....	145

ภาพที่	หน้า
100 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกครอบตัวถัง SUZUKI -BB.....	146
101 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกครอบเรือนัวครอบ SUZUKI-Mcover.....	147
102 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกโคมไฟหลัง SUZUKI-LampT.....	148
103 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกครอบแตร YAMAHA-Hcover.....	149
104 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกบังโคลนหน้า YAMAHA -WH.....	150
105 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกบังโคลนหน้า YAMAHA-RH.....	151
106 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกโคมไฟหน้า YAMAHA-LampH.....	152
107 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกไฟเลี้ยวหน้า YAMAHA-LH.....	153
108 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกไฟเลี้ยวหลัง YAMAHA-LT.....	154
109 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกใต้เครื่องยนต์ YAMAHA-Under.....	155
110 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกบังโคลนหลัง YAMAHA-RT.....	156
111 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกครอบตัวถัง YAMAHA-BB.....	157
112 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกครอบเรือนัวครอบ YAMAHA-Mcover.....	158
113 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกโคมไฟหลัง YAMAHA-LampT.....	159



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1. ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องจากอุบัติเหตุรถจักรยานยนต์ที่เกิดขึ้นในปี 2543-2545 เกิดขึ้น 11,432 ครั้ง จากอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นบนทางหลวงทั้งหมด 39,732 ครั้ง คิดเป็น 29 % ของการเกิดอุบัติเหตุบนทางหลวง โดยเฉลี่ยเกิดขึ้นปีละ 3,810 ครั้ง และมีอัตราการเพิ่มขึ้น 28 % ซึ่งทำให้มีคนตายถึง 2,582 คน (โดยเฉลี่ยปีละ 861 คน) คนบาดเจ็บ 11,755 คน (โดยเฉลี่ยปีละ 3,918 คน) (ญาติ และคณะ, 2546)

จากการสุ่มสำรวจข้อมูลการเกิดอุบัติเหตุรถจักรยานยนต์ที่เกิดขึ้นในช่วงปี 2555-2557 ในพื้นที่ สน. บางรัก ซึ่งจัดอยู่ในเขตเมือง พื้นที่ สน. ท่าข้าม ซึ่งจัดอยู่ในเขตบริเวณรอบนอก และพื้นที่ สน. กระทบแบนจัดอยู่ในเขตปริมณฑล พบว่ามีอุบัติเหตุรถจักรยานยนต์เกิดขึ้นทั้งหมด 457 1,401 และ 7 ครั้ง ตามลำดับ (โดยเฉลี่ยปีละ 152 467 และ 2 ครั้ง ตามลำดับ) จากอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นทั้งหมดพบว่ามีความเสียหายถึงจำนวน 6 ราย จากการสอบถามพบว่าเจ้าหน้าที่ทำการสืบสวนและสอบสวน จากกล้องวงจรปิด ป้ายทะเบียนรถ และพยานบุคคล จากกรณีดังกล่าวทำให้ผู้ทำวิจัยสนใจที่จะใช้นิติวิทยาศาสตร์เข้ามายืนยันข้อเท็จจริง เพื่อระบุว่าผู้ต้องหาเป็นผู้ก่อเหตุจริง โดยการตรวจสอบวัตถุพยานที่ตกอยู่ในสถานที่เกิดเหตุ ชิ้นส่วนที่พบบ่งชี้สถานที่เกิดเหตุเมื่อมีการเกี่ยวชน คือ ไฟหน้า บังโคลน และไฟท้าย ซึ่งการเกิดอุบัติเหตุสามารถจำแนกได้ สองประเภท คือ การจราจร และอาชญากรรม ซึ่งวัตถุพยานเหล่านี้สามารถยืนยันชิ้นส่วนของวัตถุพยานที่ติดอยู่กับคู่กรณีได้ ตามหลักการของโลคาร์ทที่สรุปว่า “วัตถุสองสิ่งเมื่อสัมผัสกันย่อมมีการแลกเปลี่ยนมวลสารซึ่งกันและกัน”

พลาสติกถือว่าเป็นพยานหลักฐานที่พบค่อนข้างบ่อยในสถานที่เกิดเหตุ เนื่องจากพลาสติกเป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น ส่วนประกอบของรถยนต์ รถจักรยานยนต์ เป็นต้น

เศษพลาสติกถือเป็นวัตถุพยานที่สามารถเชื่อมโยงคนร้าย ผู้เสียหาย และสถานที่เกิดเหตุให้อยู่ในเหตุการณ์เดียวกันได้ ทำให้สามารถลำดับย้อนเหตุการณ์ที่เกิดได้แล้วนำไปพิจารณาประกอบกับคำให้การของคนร้าย ผู้เสียหาย หรือพยานบุคคลว่ามีความสอดคล้องกันหรือไม่ เช่น คดีชนแล้วหนี คดีรถเฉี่ยวชน คดีฆาตกรรมอำพราง และการเรียกเงินประกัน เป็นต้น เศษพลาสติกที่ตกหล่นในสถานที่เกิดเหตุสามารถนำมาตรวจพิสูจน์เปรียบเทียบกับรถผู้ต้องสงสัยได้ บางครั้งเศษพลาสติกอาจจะติดอยู่กับเสื้อผ้าของผู้เสียหายก็สามารถตรวจพิสูจน์เพื่อเปรียบเทียบได้เช่นกัน

การตรวจพิสูจน์เศษพลาสติกสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การดูการเข้ากันของรอย การวิเคราะห์สีของพลาสติก การศึกษาองค์ประกอบของพลาสติก ความหนาแน่น เป็นต้น ผู้ทำการวิจัยสนใจที่จะใช้เทคนิค TGA และ FTIR เนื่องจากเทคนิค TGA เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนและการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก เป็นเทคนิคที่ประหยัดเวลา ส่วนเทคนิค FTIR เป็นการศึกษาการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของชิ้นส่วนพลาสติก เพื่อจำแนกและระบุชนิดของพลาสติกจากส่วนต่างๆของรถจักรยานยนต์ ซึ่งเทคนิคเหล่านี้ไม่ทำลายวัตถุพยาน ไม่จำเป็นต้องเตรียมตัวอย่างให้ยุ่งยาก แม้มีตัวอย่างเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำการวิเคราะห์ได้ สามารถนำตัวอย่างกลับมาใช้ใหม่ได้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย และให้ผลการทดลองที่แม่นยำ มีความน่าเชื่อถือสูง จากความสำคัญที่ได้กล่าวมานี้จะสามารถนำพยานหลักฐานที่ได้ตรวจพิสูจน์แล้วไปสู่การเชื่อมโยงคดีหาตัวผู้กระทำความผิดมาดำเนินคดีตามกฎหมายได้

## 2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนและการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นส่วนพลาสติกจากส่วนต่างๆของรถจักรยานยนต์

2.2 เพื่อนำคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนและการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค TGA มาใช้จำแนกและระบุชนิดของพลาสติก

2.3 เพื่อนำคุณสมบัติการดูดกลืนแสงที่ได้จากเทคนิค FTIR มาใช้จำแนกและระบุชนิดของเศษชิ้นส่วนพลาสติก

### 3. สมมติฐานการวิจัย

3.1 เศษพลาสติกแต่ละชนิดจากส่วนต่างๆของรถจักรยานยนต์มีความแตกต่างกัน เมื่อได้รับความร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนและการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่แตกต่างกัน

3.2 เศษพลาสติกแต่ละชนิดมีเอกลักษณ์ของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญแตกต่างกันทำให้การดูดกลืนแสงอินฟราเรดแตกต่างกัน โดยเทคนิค FTIR

### 4. ขอบเขตของการวิจัย

ชิ้นส่วนพลาสติกที่นำมาจากส่วนต่างๆ ของรถจักรยานยนต์โดยมีบริษัท HONDA, SUZUKI และ YAMAHA เป็นผู้ผลิต มีดังนี้ พลาสติกครอบแตร พลาสติกบังลมหน้า บังโคลนหน้า โคมไฟหน้า ไฟเลี้ยวหน้า ไฟเลี้ยวหลัง พลาสติกใต้เครื่องยนต์ บังโคลนหลัง พลาสติกครอบตัวถัง พลาสติกครอบเรือนวัตรอบและโคมไฟหลัง จำนวน 33 ตัวอย่าง

### 5. ขั้นตอนการวิจัย

- 5.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 5.2 เก็บรวบรวมตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย
- 5.3 เตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย
- 5.4 เก็บรวบรวมข้อมูลผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 5.5 สรุปผลพร้อมข้อเสนอแนะ
- 5.6 นำเสนอผลการศึกษา

### 6. นิยามศัพท์เฉพาะ

พลาสติก หมายถึง วัสดุพอลิเมอร์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นสายโซ่ยาวๆ แต่ไม่สามารถมองเห็นเป็นสายโซ่ได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งสายโซ่ดังกล่าวประกอบด้วยหน่วยย่อยๆที่เรียกว่ามอนอเมอร์ พอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) ของมอนอเมอร์ โดยใช้แหล่งวัตถุดิบจากปิโตรเคมีเป็นหลัก พลาสติกมีหลายชนิด เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC), พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลท (PET) และพอลิสไตรีน (PS) เป็นต้น

เทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) หมายถึง เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุ โดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้อง กับการดูดซับแก๊สหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry)

เทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) หมายถึง เทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีใน โมเลกุล รวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละพันธะ

## 7. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

7.1 สามารถเชื่อมโยงลำดับย้อนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ เพื่อนำตัวผู้กระทำความผิดมาดำเนินคดีตามกฎหมายได้

7.2 สามารถใช้เทคนิค TGA และ FTIR ในการทำฐานข้อมูลเกี่ยวกับพลาสติกของชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ได้



## บทที่ 2

### วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

#### 1. พลาสติก

##### 1.1 ความหมายของพลาสติก

พลาสติก จัดเป็นสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยโมเลกุลซ้ำๆ กันต่อกันเป็น โมเลกุลสายยาวๆ ประกอบด้วยธาตุสำคัญ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน นอกจากนี้อาจมีธาตุอื่นๆ เป็นส่วนประกอบย่อย ได้แก่ ไนโตรเจน ฟลูออรีน คลอรีน และกำมะถัน เป็นต้น

"พอลิเมอร์" หมายถึงวัสดุประเภทพลาสติก ยาง เส้นใย และกาว ส่วนคำว่า "พลาสติก" หมายถึงสารผสมระหว่างพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง เช่น สี สารพลาสติกไซเซอร์ สารเพิ่มเสถียรภาพ และฟิลเลอร์ ที่ถูกนำมาใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปโดยการขึ้นรูปให้มีรูปทรงต่างๆ รากศัพท์คำว่า พอลิเมอร์ หรือ polymer มาจากคำกรีก 2 คำ คือคำว่า poly แปลว่ามาก และคำว่า mer แปลว่าหน่วย ดังนั้นพอลิเมอร์จึงเป็นสารที่มีโมเลกุลประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆ กันต่อกันเป็นสายยาวๆ (พิซิต เลียมพิพัฒน์, 2537 : 8-9)

##### 1.2 การแบ่งชนิดของพอลิเมอร์

1.2.1 การแบ่งชนิดพอลิเมอร์ตามแหล่งกำเนิด สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

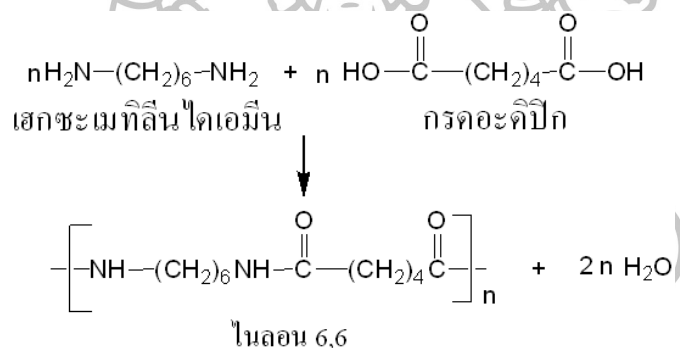
1.2.1.1 พอลิเมอร์ธรรมชาติ (natural polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ เช่น เนื้อไม้ เส้นใยธรรมชาติ โปรตีน ยางธรรมชาติ และไบโอพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ เป็นต้น

1.2.1.2 พอลิเมอร์สังเคราะห์ (synthetic polymers) ได้มาจากการเตรียมโดยปฏิกิริยาเคมีของโมโนเมอร์ (polymerization) ทำให้โมโนเมอร์หลายหน่วยเกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องได้ผลิตภัณฑ์เป็น โมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น พอลิเอทิลีน (PE) พอลิสไตรีน (PS) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และไนลอนชนิดต่างๆ เป็นต้น (เจริญ นาคะสรรค์, 2545 : 3)

## 1.2.2 การแบ่งชนิดพอลิเมอร์ตามโครงสร้างของพอลิเมอร์

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1.2.2.1 พอลิเมอร์แบบควบแน่น (condensation polymers) หมายถึง พอลิเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์แบบควบแน่นของโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่ และมักจะได้อะตอมที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น น้ำ ก๊าซ หรือเกลือ ไปพร้อมๆกับการเกิดพอลิเมอร์ สารโมเลกุลขนาดเล็กเหล่านี้ มักจะถูกขับไล่ออกจากระบบเสมอ ตัวอย่างการเกิดพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ เช่น การเตรียมไนลอน 6,6 (ภาพที่ 1) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการควบแน่นของโมโนเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ คือ กรดอะดิพิค (adipic acid) กับ เฮกซะเมทิลีน ไดเอมีน (hexamethylene diamine) ได้ผลิตภัณฑ์คือ โมเลกุลของน้ำและพอลิเมอร์ (เจริญ นาคะสรรค์, 2545 : 4-5)

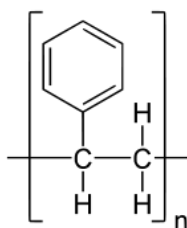


ภาพที่ 1 การเตรียมไนลอน 6,6

ที่มา : บุญรอด วงษ์สวาท, พอลิเมอร์เชิงควบแน่น, เข้าถึงเมื่อ 14 มีนาคม 2558,

เข้าถึงได้จาก [http://www.promma.ac.th/main/chemistry/boonrawd\\_site/condense.htm](http://www.promma.ac.th/main/chemistry/boonrawd_site/condense.htm)

1.2.2.2 พอลิเมอร์แบบรวม (addition polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่หลักเป็นอะตอมคาร์บอนอย่างเดียวเท่านั้น และจำนวนอะตอมในหน่วยซ้ำ (repeating unit) เท่ากับจำนวนอะตอมในโมโนเมอร์เสมอ ตัวอย่างโมโนเมอร์ในกลุ่มนี้ คือ พอลิสไตรีน (ภาพที่ 2) พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน และพอลิไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น (เจริญ นาคะสรรค์, 2545 : 5)



ภาพที่ 2 พอลิสไตรีน

ที่มา : **Polystyrene**, accessed March 14, 2015, Available from

<http://en.wikipedia.org/wiki/Polystyrene>

### 1.2.3 การแบ่งชนิดพอลิเมอร์ตามกลไกของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1.2.3.1 พอลิเมอร์แบบขั้น (step polymers) หมายถึง พอลิเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันผ่านกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบขั้น (step reaction polymerization) เกิดจากการใช้โมโนเมอร์ที่มีลักษณะทางเคมีที่แตกต่างกันอย่างน้อย 2 หมู่ ปฏิกิริยาจะเกิดระหว่างหมู่ฟังก์ชันของโมโนเมอร์ และเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นจากโมโนเมอร์เป็นไดเมอร์ ไตรเมอร์ เตตราเมอร์ และพอลิเมอร์ในตอนสุดท้ายของปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้ ทำให้ขนาดโมเลกุลของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นในอัตราที่ต่ำ ทำให้ใช้เวลานานในการเตรียมพอลิเมอร์ ตัวอย่าง เช่น พอลิอะซิเตล (polyacetal) พอลิฟีนิลีนออกไซด์ (polyphenylene oxide) และ พอลิเอไมด์ (polyamide) เป็นต้น

1.2.3.2 พอลิเมอร์แบบลูกโซ่ (chain polymers) หมายถึง พอลิเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่ผ่านกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบลูกโซ่ (chain polymerization) ซึ่งจะต้องมีตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา (initiators) ซึ่งมีจุดว่องไว (reactive center) ซึ่งอาจจะเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) อีออนบวก หรืออีออนลบ กลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบนี้ จะเกิดผ่าน 3 ขั้นตอน คือ

1. การเริ่มต้น (initiation) เมื่อตัวเริ่มต้น เกิดปฏิกิริยาแล้วเกิดจุดว่องไวบนโมเลกุล

2. การแผ่ขยาย (propagation) โดยการรวมตัวของจุดว่องไวกับ โมโนเมอร์ในลักษณะปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction)
3. การสิ้นสุดปฏิกิริยา (termination) เป็นการทำลายจุดว่องไวใน โมเลกุลพอลิเมอร์

กลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบนี้ จะได้พอลิเมอร์ที่มีขนาดโมเลกุลขนาดใหญ่เร็วมาก ตัวอย่าง เช่น พอลิไวนิลอะซิเตท (poly(vinyl acetate)) พอลิสไตรีน (polystyrene) และพอลิตetraฟลูออ เอทิลีน (poly(tetrafluoroethylene)) (เจริญ นาคะสรรค์, 2545 : 5-6)

1.2.4 การแบ่งชนิดพอลิเมอร์ตามอุตสาหกรรมการผลิตและชนิดผลิตภัณฑ์ สามารถแบ่งพอลิเมอร์ออกเป็นพอลิเมอร์หลายชนิด ดังนี้

#### 1.2.4.1 พลาสติก

เป็นพอลิเมอร์ที่เป็นของแข็งที่สามารถคงรูปร่างได้ ภายใต้สภาวะที่มีแรงกดและที่อุณหภูมิ ใช้งาน แต่จะเป็นของไหลหนืด (viscous flow) ที่อุณหภูมิที่ทำการแปรรูป สามารถแบ่งพลาสติก ออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะเฉพาะของการแปรรูป หรือพฤติกรรมในกระบวนการแปรรูป เมื่อได้รับความร้อน คือ

1.2.4.1.1 เทอร์โมพลาสติก (thermoplastics) คือ พอลิเมอร์ที่สามารถ นำกลับไปหลอมใหม่หลังจากผ่านกระบวนการแปรรูป สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก โดยที่สมบัติ ของพอลิเมอร์ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เช่น พอลิเอทิลีน พอลิสไตรีน พอลิไวนิลคลอไรด์ และพอลิซัน โฟน เป็นต้น (เจริญ นาคะสรรค์, 2545 : 7)

1.2.4.1.2 เทอร์โมเซต (thermosetting) คือ พอลิเมอร์ที่หลังจากผ่าน การแปรรูปแล้ว จะแข็งตัวอย่างถาวร เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (cross-linking reaction) ทำให้เกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างโมเลกุล การให้ความร้อนหลังการแปรรูป จะไม่มีผลทำให้เกิด การหลอม แต่จะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพและปฏิกิริยาการออกซิเดชัน หากให้ความร้อนสูงมาก จะได้อ่านสาค่าเป็นผลิตภัณฑ์ ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก ตัวอย่างเช่น เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ และอีพอกซี เป็นต้น (พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์, 2537 : 73)



#### 1.2.4.2 อีลาสโตเมอร์ (Elastomer)

อีลาสโตเมอร์จะเกิดการยืดตัวภายใต้สภาวะของแรงกด และหดตัวกลับได้เมื่อหยุดกระทำ ที่อุณหภูมิที่ใช้งาน พอลิเมอร์ที่เป็นอีลาสโตเมอร์ มีทั้งพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ยางธรรมชาติ และพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) ยางบิวตาไดอีน (BR) ยางบิวไทล์ ยางเอทิลีนโพรไพลีน (EPR) และยางคลอโรพรีน (CR) เป็นต้น

#### 1.2.4.3 เส้นใย (Fibers)

เส้นใยเป็นพอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการปั่น (spinning process) โดยการดึงให้เป็นเส้นที่มีความยาวแต่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก อิทธิพลการดึงทำให้เกิดผลึกในปริมาณสูง ทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงสูงมาก (เจริญ นาคะสรรค์, 2545 : 7) เส้นใยมีทั้งเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งมีสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อน เสียงและไฟฟ้าที่ดี เช่น เส้นใยไหม เส้นใยจากฝ้าย และเส้นใยขนสัตว์ เป็นต้น เส้นใยดัดแปลงผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ เช่น เรยอน (ผลิตจากเซลลูโลส) และเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยพอลิเอสเตอร์ ไนลอน เส้นใยจากพอลิโพรไพลีน และเส้นใยอะคริลิก เป็นต้น เส้นใยเหล่านี้มักจะใช้งานในงานทอเครื่องนุ่งห่ม ส่วนเส้นใยที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรง (reinforcing materials) ในการผลิตพอลิเมอร์เชิงประกอบ (composite polymers) เพื่อใช้งานทางวิศวกรรมด้านต่างๆ เช่น เส้นใยอะรามิด (Aramid fibers) เส้นใย เส้นใยแกรไฟท์ (graphite fiber) เส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยไนลอน เป็นต้น (ณัฐณี โลพัฒนานนท์, 2552 : 14-38)

#### 1.2.4.4 วัสดุเคลือบผิว (Surface coating)

เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดแผ่นฟิล์มบนผิวของวัสดุแข็ง นิยมใช้เป็นส่วนผสมของสี เพื่อช่วยให้สีติดผิวได้ดี และมีความทนทานต่อสภาวะที่ใช้งาน ตัวอย่างเช่น อิมัลชันของพอลิอะคริลิก อะคริลิกโคพอลิเมอร์ อิมัลชันของไวนิลอะซิเตท อัลคิลเรซิน และน้ำยางสไตรีนบิวตาไดอีนผสมกับน้ำมันชนิดต่างๆ เป็นต้น

#### 1.2.4.5 กาว (Adhesives)

กาวเป็นผลิตภัณฑ์ของพอลิเมอร์ ที่สามารถเกิดเป็นฟิล์มและเกิดพันธะเคมีกับพื้นผิวได้ดี มักใช้เชื่อมระหว่างผิวสองชนิดของวัสดุ ตัวอย่างวัสดุที่ใช้ทำกาว เช่น ซิลิโคน พอลิอะคริลิก พอลิยูรีเทน อีพอกซี และไซยาโน-อะคริเลท (Super glue) เป็นต้น

#### 1.2.4.6 ฟองน้ำ (Foams)

เป็นผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่ทำให้เกิดรูพรุน โดยการใช้สารทำให้เกิดฟอง (foaming agents) หรือใช้เทคนิคการตีผสม ฟองน้ำมีความหนาแน่นต่ำ นิยมใช้ในงานที่ต้องการความเบา เป็นฉนวน ความร้อนและไฟฟ้า ทำหุ่น ทำเฟอร์นิเจอร์ ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่สามารถผลิตฟองน้ำได้ เช่น พอลิสไตรีน พอลิยูรีเทน โคพอลิเมอร์ของเอทิลีนกับไวนิลอะซิเตท (EVA) พอลิไวนิลคลอไรด์ และยางธรรมชาติ เป็นต้น

#### 1.2.4.7 พอลิเมอร์เชิงประกอบ (Polymer Composites)

เป็นวัสดุที่ได้จากการผสมวัสดุตั้งแต่สองชนิดที่มีลักษณะต่างกันเข้าด้วยกัน วัสดุที่เป็นพอลิเมอร์เรียกว่า เมทริกซ์ (matrix) ใช้เป็นเฟสต่อเนื่องของวัสดุอีกชนิดหนึ่ง คือ วัสดุเสริมแรง ซึ่งมักเป็นเส้นใย และสารตัวเติมผงละเอียด (particulate fillers) ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่นิยมนำมาใช้เป็นเมทริกซ์ ตัวอย่างเช่น อีพอกซี และพอลิเอสเตอร์ เป็นต้น (เจริญ นาคะสรรค์, 2545 : 7-8)

### 1.2.5 การแบ่งชนิดพอลิเมอร์ตามระดับผลึก

โดยทั่วไประดับผลึก (degree of crystallinity) มักจะใช้ในการจัดจำแนกพลาสติกในกลุ่มเทอร์โมพลาสติก ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1.2.5.1 พอลิเมอร์ที่มีผลึก (crystalline polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลเป็นโซ่ตรง ทำให้โมเลกุลสามารถบิดตัว แล้วเรียงตัวให้เป็นระเบียบพร้อมๆ กันครั้งละหลายโมเลกุลได้ ทำให้เกิดส่วนที่เป็นระเบียบหรือผลึก ระดับของการเป็นผลึกของพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ในโครงสร้างพอลิเมอร์ทุกชนิดมีส่วนที่ไม่เป็นผลึกปะปนอยู่ด้วยเสมอ จึงมักเรียกพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ว่า พอลิเมอร์กึ่งผลึก (semi-crystalline polymers) ตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิโพรพิลีน (PP) ไนลอน พอลิอะซิเตท และเทอร์โมพลาสติก พอลิเอสเตอร์ เป็นต้น

1.2.5.2 พอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous polymers) มักจะเป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ขนาดใหญ่เกาะที่สายโซ่หลัก หรือเป็นพอลิเมอร์ที่มีสาขาโซ่ ทำให้ไม่สามารถเกิดการบิดตัวของสายโซ่หลักให้พับจัดตัวเองอย่างเป็นระเบียบได้ จึงทำให้ไม่มีผลึกในพอลิเมอร์ชนิดนี้

ตัวอย่างเช่น พอลิสไตรีน พอลิคาร์บอเนต พอลิซัน โฟน พอลิเมอร์อะคริลิก และโคพอลิเมอร์ของ อะคริโลไนไตรน์ บิวตาไดอิน และสไตรีน เป็นต้น (เจริญ นาคะสรรค์, 2545 : 9)

### 1.3 สมบัติและการประยุกต์ใช้งานพลาสติก

#### 1.3.1 พอลิเอทิลีน (Polyethylene)

การผลิตพอลิเอทิลีนทำได้โดยใช้เทคนิคการพอลิเมอร์ไรซ์หลายเทคนิค ได้ผลิตภัณฑ์หลายรูปแบบตั้งแต่น้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งมีลักษณะเป็นไขจนมีน้ำหนักโมเลกุล และระดับการเป็นผลึกสูง พอลิเอทิลีนมีหลายชนิด ดังนี้

##### 1.3.1.1 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE)

LDPE เป็นพลาสติกที่มีการผลิตภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง จะทำให้เกิดสาขาโซ่ จำนวนมากบนโมเลกุล LDPE ซึ่งสาขาโซ่เป็นแบบสาขาโซ่สั้น (short-chains branching, SCB) และสาขาโซ่ยาว (long-chains branching, LCB) ดังแสดงลักษณะโมเลกุล LDPE ดังภาพที่ 3 ซึ่งโมเลกุลประกอบด้วยสาขาโซ่สั้น ที่มีอะตอมคาร์บอน 2 อะตอม (C2 หรือ ethyl side group) และสาขาโซ่สั้นที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอน 4 อะตอม (C4 หรือ butyl side group) ประมาณ 15 หมู่ต่อจำนวนอะตอมคาร์บอนบนสายโซ่หลัก 1,000 อะตอม ซึ่งในจำนวนอะตอมคาร์บอนที่เท่ากันนี้จะมีสาขาโซ่ยาว (LCB) ประมาณ 3 ถึง 4 สายโซ่ เท่านั้น ส่วนของโมเลกุล LDPE จะมีส่วนที่ไม่เป็นสาขาโซ่ ซึ่งสามารถที่จะจัดเรียงตัวกันแน่น เกิดเป็นผลึก (crystalline region) แต่ผลของการมีหมู่สาขาโซ่จำนวนมาก ทำให้โมเลกุล LDPE ไม่สามารถจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบได้มากนัก ซึ่งส่งผลให้ LDPE มีสมบัติดังนี้

- 1 มีองศาของการเกิดผลึก (degree of crystallinity) ต่ำ กล่าวคือ ประมาณ 50-70 %
- 2 มีอุณหภูมิการหลอมต่ำ (110-115 °C)
- 3 มีความหนาแน่นต่ำ (โดยทั่วไป 0.91-0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

ลักษณะเฉพาะของ LDPE คือ ชิ้นงานที่ผลิตได้ค่อนข้างนุ่ม และมัน (waxy feel) ค่อนข้างจะทึบแสง ถ้าค่อยๆเผา จะไม่มีควัน ให้เปลวไฟสีเหลือง มีกลิ่นไขมัน มักจะหยดไฟขนาดเล็กตก (drip fireballs) ทนต่อสารเคมีและน้ำดีเยี่ยมที่อุณหภูมิห้อง แต่จะไม่ทนทานต่อสารเคมีภายใต้สภาวะที่มีความเค้นสูง โดยเฉพาะ LDPE ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทนทานต่อการแตกหักเนื่องจากความเค้น (Environmental Stress Cracking Resistance, ESCR) ต่ำ มีสมบัติการเป็นฉนวนที่ดีเยี่ยม โดยเฉพาะในสภาวะที่เป็นโฟม (เกรียงศักดิ์ วงศ์พร้อมรัตน์, 2556 : 35-36)



ภาพที่ 3 ลักษณะ โครงสร้างของ LDPE

ที่มา : เกรียงศักดิ์ วงศ์พร้อมรัตน์, รอบรู้เรื่องพลาสติก. (กรุงเทพฯ : อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิสถาบันพลาสติก, 2556), 36

การประยุกต์ใช้งาน LDPE ใช้ในการผลิตฟิล์ม แผ่นพลาสติก ทำบรรจุภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ฉนวนหุ้มสายไฟ ใช้ในการเคลือบผิว และผลิตชิ้นงานจากการฉีดเข้าแก้ว

### 1.3.1.2 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE)

HDPE ผลิตโดยใช้อุณหภูมิและความดันต่ำกว่า LDPE มาก และเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งสูงกว่า LDPE มีความหนาแน่นสูง มีอุณหภูมิการอ่อนตัว (softening temperature) และปริมาณการเป็นผลึกสูงกว่า LDPE

โครงสร้างของ HDPE มีสาขาโซ่น้อยมาก เป็นพอลิเมอร์ชนิดโซ่ตรง ดังนั้น โมเลกุลจึงสามารถจัดเรียงตัวได้แนบสนิทกว่า LDPE มาก จึงทำให้ HDPE มีความหนาแน่นสูงกว่า LDPE LDPE และ HDPE มีหลายสมบัติที่คล้ายคลึงกัน เช่น การมีผิวมัน มีสมบัติเป็นฉนวนและทนทานต่อสารเคมีดีทั้งคู่

การประยุกต์ใช้งาน HDPE มักจะใช้ในการผลิตชิ้นงาน โดยเทคนิคการเป่าเข้าเป่า เช่น ขวดบรรจุเครื่องดื่ม ยา และสารเคมี ของเล่นเด็ก ถังน้ำมันรถยนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังนิยมนำ HDPE ผลิตถุงพลาสติกที่ทนความร้อนสูงกว่าถุงที่ผลิตจาก LDPE แต่ถุงจาก HDPE มักจะไม่ใส เนื่องจากการมีผลึกสูง และมีผลึกขนาดใหญ่ (เจริญ นาคะสรรค์, 2545 : 54-56)

### 1.3.1.3 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene, LLDPE)

พอลิเอทิลีนชนิด LLDPE ซึ่งมีสาขาโซ่สั้นแต่มีความยาวแน่นอน และมีตำแหน่งของสาขาโซ่บนสายโซ่หลัก ที่มีระยะห่างที่แน่นอน ทำให้ LLDPE เป็นพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงโมเลกุลได้เป็นระเบียบกว่า LDPE ความเป็นระเบียบของโครงสร้างของสาขาโซ่ของ LLDPE ได้มาจากการใช้โคโมโนเมอร์ทำปฏิกิริยาร่วมกับเอทิลีน ตัวอย่างโคโมโนเมอร์ เช่น บิวทีน (butene) โพรไพลีน (propylene) เฮกซีน (hexene) ออกทีน (octene) และเดกซีน (decene) เป็นต้น โคโมโนเมอร์เหล่านี้มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเพิ่มขึ้นตามลำดับ ความยาวของสาขาโซ่ของ LLDPE ที่ผลิตจะขึ้นกับจำนวนอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุลโคโมโนเมอร์ที่ใช้ การเตรียม LLDPE ใช้กะตะลิสต์ คือ ทิทาเนียมเฮไลด์ ตรีงลงบนวัสดุชนิดต่างๆ เช่น อะลูมินา ดังนั้นการผลิต LLDPE คล้ายกับการผลิต HDPE

การประยุกต์ใช้งาน LLDPE ส่วนใหญ่ใช้ทำแผ่นและฟิล์มพลาสติก ซึ่งอาจจะใช้เดี่ยวหรือผสมกับ LDPE เพื่อเพิ่มความเหนียว สมบัติเด่นของฟิล์ม LLDPE คือ สามารถดึงได้มาก (drawdown) ทำให้สามารถผลิตฟิล์มได้บางกว่าโดยไม่มีการฉีกขาด และมีระดับผลึกสูงกว่าฟิล์ม LDPE (เจริญ นาคะสรรค์, 2545 : 56-57)

#### 1.3.1.4 พอลิเอทิลีนที่มีการเชื่อมโยง (Cross-linked Polyethylene, XLPE)

เตรียมโดยการใช้อิทธิพลของรังสี หรือการใช้อิทธิพลทางเคมี การฉายรังสีจะทำให้พันธะ C-H และ C-C ในโครงสร้างของพอลิเอทิลีนเกิดการขาดเนื่องจากทนต่อรังสีพลังงานสูงไม่ไหว จึงเกิดเป็นอนุมูลอิสระ เนื่องจากเกิดการขาดขวางสายโซ่พอลิเมอร์ในระบบอนุมูลอิสระจึงเกิดการรวมตัวกับอนุมูลอิสระที่อยู่บริเวณใกล้เคียง เกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ โมเลกุลของพอลิเอทิลีนจะเกิดการเชื่อมโยง แล้วเปลี่ยนจากการเป็นเทอร์โมพลาสติกเป็นเทอร์โมเซต รังสีจะมีผลต่อโครงสร้างที่แข็งแรง ทำให้รังสีกระจายเข้าไปยาก ดังนั้นจึงนิยมใช้ LDPE เป็นวัตถุดิบในการเตรียม XLPE โดยวิธีการนี้

ส่วนการเตรียม XLPE ทางเคมี โดยใช้สารเพอร์ออกไซด์ชนิดพิเศษเป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยเพอร์ออกไซด์ชนิดนี้จะสามารถเกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลได้หลายตำแหน่งในเวลาเดียวกัน ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้พอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมโยง ตัวอย่าง เพอร์ออกไซด์ที่ใช้ เช่น triallyl cyanurate เป็นต้น

สมบัติของ XLPE คือ ไม่เกิดการหลอมเมื่อได้รับความร้อน แต่จะสลายตัวแล้วกลายเป็นถ่าน แต่จะสามารถทำให้เกิดการอ่อนตัวได้ระดับหนึ่ง ถ้ามีปริมาณพอลิเอทิลีนที่ไม่เกิดการเชื่อมโยงในโครงสร้างสูง โดยทั่วไปในโครงสร้าง XLPE จะมีการเชื่อมโยงในโครงสร้างประมาณ 80% ซึ่งทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีสมบัติเด่น เช่น การทนทานต่อการกระแทก การทนทานต่อการแตกเนื่องจากความเค้น (ESCR) สูงกว่าพอลิเอทิลีนชนิดธรรมดา มักจะนิยมใช้ทำถังขยะขนาดใหญ่ ถังบรรจุของเหลวใช้ในประเทศที่มีอากาศหนาวเย็น เคลือบลวดและเคเบิล

#### 1.3.2 พอลิโพรไพลีน (Polypropylene, PP)

สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเติมหรือรวมตัวของมอนอเมอร์โพรไพลีน (Propylene) เข้าด้วยกันเป็นสายโซ่ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารประกอบพวกโลหะ เช่น ไทเทเนียมคลอไรด์ แต่ถ้าหากใช้ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาและสถานะของการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน จะได้พอลิโพรไพลีน ที่มีการจัดเรียงโครงสร้างต่างกัน 3 ชนิด คือ Isotactic Syndiotactic และ Atactic ขึ้นอยู่กับทิศทางกรจับของหมู่เมทิลกับอะตอมคาร์บอน โดย

พอลิโพรพิลีน ประเภท Isotactic นำมาผลิตเป็นพลาสติกที่ใช้อยู่โดยทั่วไป เนื่องจากโครงสร้างมีการจัดเรียงของหมู่เมธิลอยู่ด้านเดียวกันอย่างเป็นระเบียบจึงมีความเป็นผลึกสูง ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรง ทนทาน ตรงข้ามกับชนิด Atactic ที่จะมีความเหนียวมากกว่าเนื่องจากหมู่เมธิลมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ส่วนชนิด Syndiotactic หมู่เมธิลจัดเรียงตรงข้ามกันมีความแข็งแรงน้อยกว่า แต่จะทนทานมากกว่าชนิด Isotactic ตัวอย่างการใช้งาน เช่น เครื่องใช้ในบ้าน (อ่าง ถัง ตะกร้า ขวด) ถูพลาสติกกรอง ของเล่นเด็ก ชิ้นส่วนทางไฟฟ้า เป็นต้น (เกรียงศักดิ์ วงศ์พร้อมรัตน์, 2556 : 37-38)

### 1.3.3 พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride), PVC)

PVC เป็นเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลอิสระ โดยใช้เทคนิคการพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอย (suspension polymerization) อิมัลชัน (emulsion polymerization) บัลด์ (bulk polymerization) หรือ แบบปสารละลาย (solution polymerization) ลักษณะหน่วยซ้ำของ PVC แสดงดังนี้



ภาพที่ 4 พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride), PVC)

ที่มา : Burke, James, **Poly(vinyl chloride)**, accessed March 14, 2015, Available from

<http://pslc.ws/macrog/pvc.htm>

โมโนเมอร์ที่ใช้ในการผลิต PVC คือ ไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ (Vinyl Chloride Monomer, VCM) มีความเป็นพิษสูงมาก และเป็นสาเหตุทำให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ได้ ดังนั้นในการผลิต PVC จึงมีมาตรการในการควบคุมการรั่วไหล และการตกค้างของ VCM ในพอลิเมอร์กันอย่างกวาดขันมาก โดยทั่วไป PVC ที่ผลิตจากโรงงานจะไม่มี VCM หลงเหลือ และไม่มีความเป็นพิษ

การประยุกต์ใช้งาน PVC ในหลายรูปแบบที่เกี่ยวข้องกับการทนทานการขีดไฟ เช่น ใช้เป็น หุ้มสายไฟและสายเคเบิล ซึ่งจะใช้ PVC ก็ต่อเมื่อต้องการให้ทนต่อการขีดไฟมากกว่าต้องการสมบัติ เป็นฉนวน (เจริญ นาคะสรรค์, 2545 : 59-61)

#### 1.3.4 พอลิเมอร์กลุ่มสไตรีน (Styrenics)

พอลิเมอร์ในกลุ่มสไตรีน หรือพอลิเมอร์ที่มีพอลิสไตรีนเป็นองค์ประกอบ มีหลายชนิดแต่ ชนิดที่รู้จักกันทั่วไป คือ พอลิสไตรีน (PS) พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (High Impact Polystyrene, HIPS) โคพอลิเมอร์ของสไตรีนกับอะคริโลไนไตรน์ (Styrene Acrylonitrile copolymer, SAN) และอะคริโลไนไตรน์ บิวตาไดอีน สไตรีน (Acrylonitrile Butadiene Styrene terpolymer, ABS) เป็นต้น

พอลิสไตรีน เป็นพอลิเมอร์ที่ผลิตจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลอิสระของ โมโนเมอร์ คือ สไตรีน ใช้สารประกอบเพอร็อกไซด์ หรือออกซิเจนเป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา ใช้เทคนิคการพอลิเมอไรเซชันแบบบัตช์ หรือแบบแวนดอยด์

โครงสร้างของ PS มีหมู่เบนซีนอิสระบนสายโซ่หลักของคาร์บอน เบนซีนเป็นหมู่ที่มี ขนาดใหญ่กว่าหมู่เมทิลและหมู่คลอรีน จึงทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนตัวและการจัดเรียงตัว ของโมเลกุล PS ทำให้โอกาสที่จะเกิดผลึกน้อย พอลิเมอร์ชนิดนี้จึงเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน 100% มีช่องว่างขนาดใหญ่ในโครงสร้าง เมื่อแสงตกกระทบ จะเกิดการส่งผ่านทั้งหมด โดยไม่มีการ สะท้อนกลับเลย ทำให้ PS โปร่งใสมาก เม็ด PS จะมีลักษณะแวววาว

สมบัติทางเคมีของ PS คือ ละลายได้ดีในตัวทำละลายอะโรมาติก และตัวทำละลายที่เป็น สารประกอบที่มีคลอรีนในโมเลกุล (chlorinated solvent) จะไม่ละลายน้ำ ติดไฟได้ง่าย โดยขณะติด ไฟจะให้เปลวไปสีเหลือง และมีเขม่าดำมาก การใช้งาน PS จึงมักมีการผสมสารเติมแต่งประเภท สารทนไฟเสมอ ซึ่งส่งผลให้ความโปร่งใสลดลง ทำให้พอลิเมอร์เปลี่ยนเป็นสีเหลือง และเกิดการ แดกภายใต้สภาวะที่มีความเค้น นอกจากนี้ PS ยังมีความเปราะเนื่องจากหมู่เบนซีนไปขัดขวางการ เคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกันของโมเลกุลเมื่อได้รับแรง ดังนั้นจึงเหมาะกับการใช้งานที่มีระยะเวลาใช้ งานสั้นๆ เช่น การทำบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง งานที่ต้องการความใส งานที่ความเปราะไม่มี ผลต่อการใช้งาน และมีราคาต้นทุนถูก



นอกจากพอลิสไตรีนทั่วไปแล้ว ยังมีการใช้งานพอลิสไตรีนในรูปแบบต่างๆ ดังนี้ คือ

#### 1.3.4.1 โฟมพอลิสไตรีน (Expandable polystyrene, EPS)

เป็นโฟมหรือฟองน้ำที่ผลิตจากพอลิสไตรีน โดยการผสม PS กับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ทำหน้าที่เป็นสารฟู (blowing agent) เช่น ไอโซเพนเทน หรือบิวเทน ทำให้เกิดฟองน้ำที่มีโครงสร้างแบบเซลล์ปิด (close-cell structure) มีความหนาแน่นต่ำมาก สมบัติของ EPS คือเป็นฉนวนความร้อนดีมาก สามารถดูดพลังงานจากการกระแทกได้ดี ลอยน้ำ ราคาถูก และมีน้ำหนักเบา จึงเหมาะที่จะใช้งานเป็นฉนวนป้องกันความร้อน วัสดุกันกระแทกของบรรจุภัณฑ์เครื่องมือ และเครื่องไฟฟ้าที่มีราคาแพงและแตกหักได้ง่าย เช่น คอมพิวเตอร์ โทรทัศน์ เป็นต้น และทำบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารและเครื่องดื่ม ซึ่งมักจะใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง เป็นต้น

#### 1.3.4.2 พอลิสไตรีนชนิดทนต่อแรงกระแทก (High Impact Polystyrene, HIPS)

เป็นการปรับปรุงสมบัติด้านความเหนียวหรือการทนทานต่อแรงกระแทกของ PS โดยการผสมเข้ากับ PS ยางที่นิยมใช้คือ ยางบิวตาไดอีน (BR) หรือยางสไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) จะได้ HIPS ที่มีการทนทานต่อการกระแทกสูงมาก สมบัติของ HIPS จะขึ้นกับขนาดอนุภาคที่เกิดจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งโดยทั่วไปจะมีขนาดอยู่ในช่วง 1-10 ไมครอน HIPS ชนิดนี้มีความใส เนื่องจากมีเฟสเพียงเฟสเดียว แต่ไม่ใสเท่า PS ทั่วไป

#### 1.3.4.3 โคพอลิเมอร์ของสไตรีนกับอะคริโลไนไตรน์ (SAN)

เตรียมโดยการทำโคพอลิเมอไรเซชันระหว่างสไตรีนกับอะคริโลไนไตรน์ทำให้ได้โคพอลิเมอร์ออสถฐานแบบสุ่ม ซึ่งมีสไตรีนเป็นองค์ประกอบประมาณ 65-70% สมบัติที่ได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้น คือ การทนทานต่อสภาวะแวดล้อม (weatherability) การทนทานต่อการแตกเนื่องจากความเค้น และสมบัติการเป็นชั้นกั้นก๊าซ (barrier properties) นอกจากนี้ SAN มีสภาพขั้ว

เนื่องจากการมีหมู่ไซยาโน (-CN) ในโครงสร้าง ทำให้มีความทนทานต่อน้ำมัน และตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น น้ำมัน ไขมัน เป็นต้น นอกจากนี้สภาพขั้วยังมีผลต่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ทำให้ SAN ทนต่อแรงดึงสูงกว่า PS ประมาณ 10 เท่า และอุณหภูมิที่พอลิเมอไร

บิดตัวภายใต้สภาวะที่มีแรงกด (heat distortion temperature under load) สูงกว่า PS ประมาณ 10 เท่า สมบัติอื่นๆของ SAN คือ มีความใส แต่ข้อด้อยของ SAN คือแปรรูปได้ยากกว่า PS

การประยุกต์ใช้ SAN มักจะเป็นงานที่ต้องการสมบัติการทนน้ำมัน หรือการเป็นชั้นกั้นก๊าซ เช่น ถังของเครื่องล้างจานอัตโนมัติ ฝาครอบมิเตอร์ บรรจุภัณฑ์อาหาร ยา และเครื่องสำอาง เป็นต้น

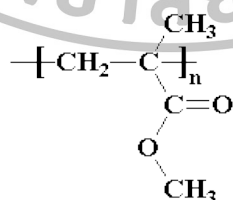
#### 1.3.4.4 อะคริโลไนไตรน์ บิวตาไดอีน สไตรีน (ABS)

สามารถผลิตได้ทั้งอยู่ในรูปพอลิเมอร์เบสติกและเทอร์พอลิเมอร์ (terpolymer) จากจุดเด่นของสมบัติของ SAN และ HIPS พบว่าข้อด้อยของ SAN คือ มีการทนทานต่อการกระแทกต่ำ ดังนั้นเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติผสมผสานกันระหว่าง SAN และ HIPS จึงมีการผลิตพอลิเมอร์ ชนิดใหม่ คือ ABS ซึ่งมีความเหนียว ทนต่อตัวทำละลาย มีความมัน และแปรรูปง่าย

การประยุกต์ใช้ ABS มักจะใช้ในการผลิตเครื่องรับโทรทัศน์ หมวกกันน็อก ท่อสำหรับถ่ายของเสีย กระจาเดินทาง นอกจากนี้สามารถชุบโลหะ (electroplated) ได้ เช่น ใช้ทำหัวก๊อ๊ก มือถือวิทยุ อะไหล่จักรยานและมอเตอร์ไซด์ เป็นต้น

#### 1.3.5 พอลิเมทิลเมทาคริเลท (Poly(methyl methacrylate), PMMA)

PMMA เป็นไวนิลพอลิเมอร์ ผลิตจากการพอลิเมอไรเซชันแบบรวมตัว โดยผ่านกลไกแบบอนุมูลอิสระ โดยใช้ตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา เช่น สารประกอบเปอร์ออกไซด์ หรือสารประกอบอะโซ (azo compound) ใช้เทคนิคการพอลิเมอไรเซชันแบบบัลค์ หรือแชนลอย ได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะอะแทกติก (atactic) ซึ่งมีโครงสร้างดังนี้



ภาพที่ 5 พอลิเมทิลเมทาคริเลท (Poly(methyl methacrylate), PMMA)

ที่มา : **Poly(methyl methacrylate)**, accessed March 14, 2015, Available from

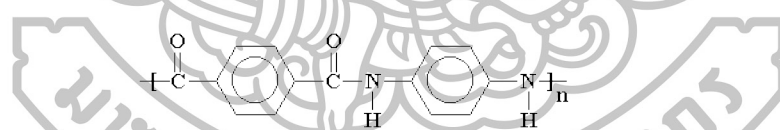
<http://pslc.ws/mactest/pmma.htm>



เป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างของแต่ละหน่วยซ้ำ และได้โมเลกุลขนาดเล็ก เช่น น้ำ เป็นผลพลอยได้ ตัวอย่างปฏิกิริยาการเตรียมไนลอน เช่น การเตรียมไนลอน-6,6 จากโมโนเมอร์สองชนิด คือ กรดอะไดปิก (adipic acid) และไดเอมีน คือ เฮกซะเอทิลีน ไดเอมีน (hexamethylene diamine)

สมบัติของไนลอนมีอิทธิพลเนื่องมาจากการมีหมู่เอไมด์ การมีพันธะ  $-N-H$  และ  $-C=O$  ทำให้โมเลกุลไนลอนมีสภาพที่เป็นขั้วสูง ทำให้ไนลอนเป็นพอลิเมอร์ที่มีระดับของผลึกสูง ส่งผลต่อสมบัติด้านความแข็งแรง ความเหนียว ความแข็ง และทนต่อการสึกหรอสูง นอกจากนี้ยังลดการแพร่ผ่านของโมเลกุลก๊าซและไอ มีลักษณะ โปร่งแสง มีช่วงอุณหภูมิการหลอมแคบแต่หลอมที่อุณหภูมิสูง นิยมประยุกต์ใช้ในลอนในงานที่ต้องสัมผัสกับน้ำมัน เช่น ทำพวงมาลัยเพาเวอร์ ถังน้ำมันเบรคกล่องบรรจุเบรค ฝาครอบล้อ สายตรึงอุปกรณ์ในฝากระโปรง อุปกรณ์ประกอบ เกียร์ ครัชต์ และเพลลา เป็นต้น

ยังมีพอลิเอไมด์อีกชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานในทางวิศวกรรมกันมาก ส่วนใหญ่จะใช้งานในลักษณะที่เป็นเส้นใย พอลิเอไมด์ชนิดนี้มีชื่อเรียกว่า อะรามิด (Aramids) มักจะไม่นิยมเรียกว่าไนลอน ตัวอย่างโครงสร้างของหน่วยซ้ำของอะรามิด เป็นดังนี้



ภาพที่ 7 อะรามิด (Aramids)

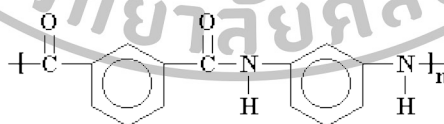
ที่มา : **Aramids**, accessed March 14, 2015, Available from <http://pslc.ws/macrog/aramid.htm>

จะเห็นว่าบนสายโซ่หลักวงแหวนเบนซีนที่มีหมู่แทนที่อยู่ตำแหน่งพารา การมีวงแหวนเบนซีน ทำให้อะรามิดมีสมบัติด้านความแข็ง และความแข็งแรงเหนือไนลอนทุกชนิด ถ้านำพอลิเมอร์ชนิดนี้ไปปั่นเส้นใยได้เส้นใยที่มีชื่อว่า เคฟลาร์ (Kevlar) ซึ่งเป็นเส้นใยอินทรีย์ที่มีความสำคัญมากที่สุดชนิดหนึ่ง มีสมบัติทั่วไป ดังนี้

- 1 มีการทนต่อแรงดึงสูงมากทั้งๆที่มีน้ำหนักเบา
- 2 มีโมดูลัสสูง (มีความแข็งแรง)
- 3 ทนทานต่อสารเคมี
- 4 มีความเหนียวสูงมาก
- 5 นำไฟฟ้าต่ำมาก
- 6 มีการยึดที่จุดขาดต่ำ
- 7 หดตัวที่อุณหภูมิต่ำน้อย
- 8 มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทรง

ทำให้เคฟลาร์เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานหลายรูปแบบ เช่น ทำเสื้อกันกระสุน ทำสายพานและท่อที่ใช้ที่อุณหภูมิสูง เช่น ในเครื่องอุตสาหกรรม และในรถยนต์ เป็นต้น ใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในการผลิตพอลิเมอร์เชิงประกอบ เพื่อใช้ในการผลิตชิ้นส่วนของเครื่องบิน เรือเดินสมุทร อุปกรณ์กีฬา หุ้มสายเคเบิลที่ใช้งานในสถานะที่รุนแรง เช่น ใต้ท้องทะเล ที่ร้อนจัด ทำแผ่นเบรก และครีทท์ ทำล้อเครื่องบิน รถบรรทุก ทำเชือกที่ทนทานสูง เช่น เชือกที่ใช้ในการลากอวนขนาดใหญ่ และเชือกที่ใช้ในการยกสิ่งของขนาดใหญ่ เป็นต้น

อะรามิดอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในงานวิศวกรรม คือ โนแมกซ์ (Nomex) มีลักษณะโครงสร้างของหน่วยซ้ำคล้ายกับเคฟลาร์ แต่วงแหวนเบนซีนบนสายโซ่หลักจะมีหมู่แทนที่ในตำแหน่งเมตา ดังนี้



ภาพที่ 8 โนแมกซ์ (Nomex)

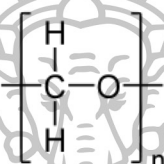
ที่มา : **Nomex**, accessed March 14, 2015, Available from

[http://www.chem.uwec.edu/Chem405\\_s01/malenirf/project.html](http://www.chem.uwec.edu/Chem405_s01/malenirf/project.html)

โนแมกซ์มีสมบัติคล้ายเคฟลาร์ แต่จะทำการแปรรูปได้ง่ายกว่า ใช้งานในลักษณะที่เป็นเส้นใย และในรูปพลาสติกแผ่น การประยุกต์ใช้งานคล้ายๆกับเคฟลาร์ (เจริญ นาคะสรรค์, 2545 : 67-71)

### 1.3.8 พอลิอะซิเทท (Polyacetal)

พอลิเมอร์ชนิดนี้มีชื่อเรียกหลายชื่อ เช่น พอลิออกซีเมทิลีน (Polyoxymethylene, POM) พอลิฟอร์มัลดีไฮด์ (Polyformaldehyde) หรือ อะซิเทท (Acetal) เป็นพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานแข่งขันกับไนลอนในงานประเภทเดียวกัน ลักษณะหน่วยซ้ำของ POM เป็นดังนี้



ภาพที่ 9 พอลิออกซีเมทิลีน (Polyoxymethylene, POM)

ที่มา : **Polyoxymethylene**, accessed March 14, 2015, Available from

<http://en.wikipedia.org/wiki/Polyoxymethylene>

ในโครงสร้างของหน่วยซ้ำที่ไม่มีหมู่แทนที่ ทำให้อะซิเททเป็นพอลิเมอร์ที่มีระดับการเป็นผลึกสูงมาก กล่าวคือ มีระดับการเป็นผลึกสูงที่สุดในบรรดาพลาสติกทั้งหมด ส่งผลให้พอลิเมอร์ชนิดนี้ มีความแข็ง และความแข็งแรงสูงที่สุดในบรรดาเทอร์โมพลาสติกทั้งหมด สมบัติอื่นๆ เช่นกันการซึมผ่านของก๊าซดี ทนทานต่อตัวทำละลาย มีการทนทานต่อการขีดและการฉีกขาด มีความเหนียว นอกจากนี้สมบัติด้านการสัมผัส (แรงเสียดทาน และการสึกหรอ) ดีมาก

ถึงแม้ว่าใน โมเลกุลอะซิเททจะมีพันธะ  $\text{-C-O-}$  ซึ่งมีสภาพความเป็นขั้ว แต่มีระดับต่ำกว่าความเป็นขั้ว พันธะ  $\text{-C=O}$  ในโมเลกุลไนลอน ทำให้มีโอกาสเกิดพันธะระหว่างโมเลกุลของอะซิเททได้ต่ำ และไม่ไวต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว มีการดูดความชื้นในอากาศต่ำ (ประมาณ 0.22%) ซึ่งต่ำกว่าไนลอนถึง 10 เท่า ทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้ เหมาะกับการประยุกต์ใช้งานในสถานะที่มีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องมากกว่าไนลอน ตัวทำละลายที่มีผลเสียต่อพอลิอะซิเทท คือ กรดและ

สารที่เกิดการออกซิไดซ์แรง จึงนิยมใช้พอลิอะซิเตลในการทำถังส้วม ฝักบัวอาบน้ำ ข้อต่อท่อน้ำ วาล์วน้ำ และถังน้ำอุ่น เป็นต้น

การมีสถานะความเป็นขั้วต่ำ ทำให้อะซิเตลไม่ค่อยเกิดพันธะเคมีกับวัสดุชนิดอื่น เช่นเดียวกับกรณีไนลอน จึงทำให้มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ทำให้มีผิวลื่นและมัน ประกอบกับการมีสมบัติด้านความแข็งแรงดีเยี่ยม ทำให้นิยมใช้อะซิเตลในการทำเกียร์ ลูกบิด รางรอก กรอบเลื่อน ที่จับหมุนเลื่อนกระจกรถยนต์ และแปรง เป็นต้น

มีการผลิตอะซิเตล 2 ชนิด คือ โสโมพอลิเมอร์ และ โคพอลิเมอร์ การเตรียมโสมพอลิเมอร์เตรียมจากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของฟอร์มัลดีไฮด์ ตัวอย่างการค้าของ อะซิเตลประเภทนี้ เช่น Delrin พอลิเมอร์ชนิดนี้จะว่องไวต่อการเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนมาก ทำให้เกิดการหลุดของโมเลกุลฟอร์มัลดีไฮด์ เรียกว่า เกิดการดีพอลิเมอไรเซชัน (depolymerization) หรือการถอดซิป (unzipping) เพื่อลดการเสื่อมสภาพในลักษณะนี้ จึงมักจะมีการเติมสารเคมีให้เกิดปฏิกิริยากับส่วนปลายโมเลกุล เรียกว่า เป็นการทำเอนเคปปีง (end-capping)

โคพอลิเมอร์เตรียมจากปฏิกิริยาของฟอร์มัลดีไฮด์กับเอทิลีนออกไซด์ หรือการทำปฏิกิริยาแบบเปิดวงแหวนระหว่างไดออกเซน (dioxane) กับเอทิลีนออกไซด์ ตัวอย่างของโคพอลิเมอร์ของอะซิเตล เช่น Celcon และ Hostaform เป็นต้น

### 1.3.9 พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลท (PET)

PET มีหมู่เมทิลีน 2 หมู่ ทำให้สายโซ่โมเลกุลค่อนข้างแข็ง เมื่อเปรียบเทียบกับ PBT พอลิเมอร์ชนิดนี้เกิดผลึกง่ายมาก ถ้าหล่อเย็นอย่างรวดเร็วจากสถานะหลอม ( $T_m=245-271\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) จนถึง  $T_g$  ( $60-81\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ได้พอลิเอสเทอร์ที่เป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน ซึ่งมีความโปร่งใสสูงมาก ถ้าให้ความร้อนใหม่อีกครั้งแล้วค่อยๆปล่อยให้เย็น จะเกิดผลึกประมาณ 30% ดังนั้นสมบัติเด่นของพอลิเมอร์ชนิดนี้ไม่มีผลเนื่องมาจากการมีผลึกและมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่นเดียวกับไนลอน และอะซิเตล แต่จะมาจากปรากฏการณ์จัดเรียงตัวของโมเลกุล (orientation effect) กล่าวคือ ทำให้โมเลกุลเกิดการเรียงตัวในทิศใดทิศหนึ่ง โดยการดึงในแนวแกนเดียว (uniaxial stretching) ซึ่งส่งผลให้มีความแข็งแรงได้ทั้งสองทิศทางโดยการดึงในแนวสองแกน (biaxial stretching)

ปรากฏการณ์จัดเรียงตัวของโมเลกุล จะเกิดกับพอลิเมอร์ที่มีหน่วยซ้ำขนาดใหญ่ ดังเช่น PET ซึ่งการแปรรูปทั่วไปมักจะขึ้นรูปขึ้นงาน แล้วหล่อเย็นอย่างรวดเร็วได้พอลิเมอร์อสัณฐานก่อน แล้วนำมาให้ความร้อนใหม่เพื่อทำการดึงให้เกิดการจัดเรียงโมเลกุล โดยการดึงขณะร้อนแล้วทำให้พอลิเมอร์เกิดผลึกโดยค่อยๆหล่อเย็น การเกิดผลึกจะทำให้โมเลกุลที่จัดเรียงตัวแล้วถูกบีบอัดให้เคลื่อนตัวได้น้อยลง ซึ่งส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลในแนวที่ดึงดีมาก การแปรรูป PET โดยการดึงในแนวแกนเดียว ใช้ในการผลิตเส้นใย และเทปบันทึกเสียงและภาพ เป็นต้น ส่วนการดึงในแนวสองแกน ใช้ในการผลิตพลาสติกที่ใช้ทำฟิล์มถ่ายภาพ ฟิล์มเอ็กซ์เรย์ การผลิตภาชนะบรรจุ เช่น ขวดเครื่องดื่ม ซึ่งแปรรูปโดยเทคนิคการเป่าแบบมีการดึงในแนวสองแกน (stretch blow molding) ซึ่งการแปรรูปแบบนี้จะเป่าขึ้นรูปพรีฟอร์มที่เป็นพอลิเมอร์อสัณฐานก่อน แล้วจึงนำไปให้ความร้อนก่อนทำการดึง แล้วปล่อยให้เกิดผลึกที่มีขนาดเล็ก ทำให้เกิดการกระเจิงของแสงต่ำ ส่งผลให้ขวด PET มีความใส

#### 1.3.10 พอลิบิวทิลีนเทอเรพทาเลท (PBT)

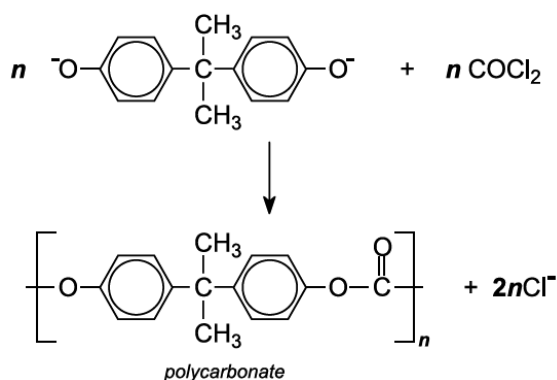
มีหมู่เมทิลีน 4 หมู่ ทำให้มีความยืดหยุ่น และเกิดผลึกได้เร็วกว่า PET การเตรียมขึ้นงานที่ทำให้เกิดการเรียงตัวเหมือนกรณี PET ทำได้ยาก จึงนิยมประยุกต์ PBT ในการฉีดเข้าเบ้า เนื่องจากมีวัฏจักรของการผลิตสั้น สมบัติอื่นๆของ PBT คือ มีอุณหภูมิหลอม (224-267°C) ต่ำกว่า PET มีความหนืดขนาดหลอมต่ำ จึงเหมาะแก่การผลิตขึ้นงานโดยการฉีดเข้าเบ้าที่มีความซับซ้อนได้ นอกจากการใช้ PBT ในรูปแบบโพลิเมอร์แล้วยังใช้ PBT ในรูปแบบเสริมแรงด้วยสารตัวเติมและเส้นใยหลายประเภท ทำให้สมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิสูงดีขึ้น มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ทนต่อการสึกหรอดีมาก สมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าดี ดูดความชื้นต่ำ ขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ

ดังนั้นจึงนิยมใช้ PBT ในการผลิต ข้อต่อสายไฟ ฝาครอบมอเตอร์ บั๊ม และมิเตอร์ อุปกรณ์บอดีรถยนต์ ครอบกระจกด้านนอกรถยนต์ ฝาครอบเครื่องมือต่างๆ มือจับของใช้ในครัว โรเตอร์ และวาล์ว เกียร์รถยนต์ ลูกบิด และกรอบที่ปิดน้ำฝน เป็นต้น

#### 1.3.11 พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC)

พอลิคาร์บอเนตเตรียมจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น โมโนเมอร์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ บิสฟีนอลเอ (bis-phenol A) กับฟอสจีน (phosgene) ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้





ภาพที่ 10 พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC)

ที่มา : **Polycarbonate**, accessed March 14, 2015, Available from

<http://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polycarbonates.html>

โครงสร้างของหน่วยซ้ำของ PC มีความซับซ้อน และมีความเคาะเนื่องจากการมีหมู่เมทิลอิสระ ทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้เป็นพอลิเมอร์สัณฐาน มีความใส แต่การมีวงแหวนเบนซีนอยู่ในโครงสร้างหลักจำนวนมาก และการมีหมู่คาร์บอเนตที่มีสภาพการเป็นขั้ว ทำให้ PC มีความแข็งแรงเกือบพอกับพอลิเมอร์ที่มีผลึกสูง เช่น ไนลอน หรืออะซิเทท แต่ PC จะมีความเหนียวสูงกว่าพอลิเมอร์เหล่านี้ การมีความเหนียวหรือการทนทานต่อการกระแทกสูง เนื่องจากเมื่อโมเลกุลได้รับแรงจะสามารถยืดตัวตามแรงกระทำได้ระดับหนึ่ง เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน นอกจากนี้ อุณหภูมิหลอมและอุณหภูมิการใช้งานของ PC จะสูงกว่าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้ กล่าวคือ สามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ  $135^{\circ}\text{C}$  นอกจากนี้ PC มีการทนต่อการคืบ (creep resistance) สูงในช่วงอุณหภูมิกว้าง จึงทำให้ PC มีการคงทนของรูปทรงดี

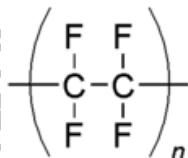
สมบัติที่เด่นที่สุดของ PC คือ ความเหนียว ความใส และมีอุณหภูมิอ่อนตัวภายใต้แรงกดสูง การประยุกต์ใช้งาน PC จะใช้ความเด่นเหล่านี้เป็นเกณฑ์ แต่ข้อด้อยของพอลิเมอร์ชนิดนี้มีหลายประการ เช่น ไม่ทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งจะเปลี่ยนสีเป็นสีเหลือง และสูญเสียสมบัติเชิงกล นอกจากนี้ชิ้นงาน PC เกิดรอยขีดข่วนได้ง่าย ซึ่งจะมีผลต่อการประยุกต์ใช้งานที่เกี่ยวข้องกับความใส เช่น ทำกระจกนาฬิกา หรือเลนส์แว่นตา เป็นต้น แต่ในปัจจุบันแก้ปัญหานี้โดยการเคลือบด้วยวัสดุอื่นที่ทนทานต่อการขีดข่วนมากกว่าชิ้นงาน PC ข้อด้อย

อื่นๆของ PC คือ ความว่องไวต่อตัวทำละลายประเภทอะโรมาติกส์ คลอรีเนท และตัวทำละลายที่มีขั้วบางตัว ไม่ทนทานต่อสารละลายที่เป็นด่างแก่ ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นรอยแตกเล็กๆ แต่ความว่องไวต่อการละลายมีข้อดี คือ ทำให้สามารถเชื่อมหรือต่อชิ้นงาน PC โดยการใช้อุณหภูมิที่ละลายในตัวทำละลายชนิดๆได้ดี

การประยุกต์ใช้งาน PC และพอลิเมอร์เบลนด์ มักจะใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ เช่น ทำแถบสะท้อนแสง ไฟหน้า เลนส์ครอบไฟ กล้องของมิเตอร์ กันชน ฝาครอบล้อ และฝาครอบสัญญาณไฟจราจร เป็นต้น ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทำข้อต่อ เกียร์ ตัวครอบจอยคอมพิวเตอร์ และครอบเครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์ เป็นต้น

### 1.3.12 พอลิเตตราฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE)

PTFE เตรียมจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบรวมตัวของโมโนเมอร์ คือ เตตราฟลูออโรเอทิลีน ผ่านกลไกแบบอนุมูลอิสระ ได้พอลิเมอร์ที่มีหน่วยซ้ำ ที่มีลักษณะดังนี้



ภาพที่ 11 พอลิเตตราฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE)

ที่มา : **Polytetrafluoroethylene**, accessed March 21, 2015, Available from

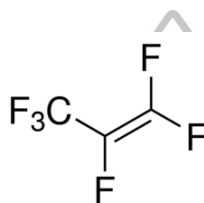
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PTFE\\_structure.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PTFE_structure.png)

โครงสร้างของโมเลกุล PTFE มีเฉพาะอะตอมฟลูออรีนและคาร์บอนเท่านั้น ดังนั้นสมบัติเฉพาะของพอลิเมอร์ชนิดนี้ จึงมาจากการมีอะตอมของฟลูออรีน ซึ่งมีธาตุที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงที่สุด ทำให้อิเล็กตรอนถูกดึงเข้าใกล้อะตอมฟลูออรีนมาก ทำให้เกิดพันธะ C-F ที่เสถียรมาก และไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีกับสารใดๆเลย ทำให้ PTFE ไม่เกิดพันธะเคมีกับวัสดุชนิดอื่น ส่งผลให้ไม่ติดกับวัสดุใดๆเลย (nonstick property) และผิวของ PTFE มีความลื่นสูงมาก จึงเหมาะกับการใช้งานในการเคลือบถังสารเคมี เครื่องครัว เครื่องมือทางการแพทย์ เคลือบลูกกอล์ฟที่ใช้ในเครื่อง

พรีนเตอร์ เครื่องถ่ายภาพเอกสาร เครื่องแปรรูปอาหาร และเบร้ง เป็นต้น นอกจากนี้ PTFE จะทนทานต่อตัวทำละลายทุกชนิด จึงเหมาะกับการใช้เป็นถังเก็บสารเคมี

### 1.3.13 พอลิเฮกซะฟลูออโรโพรไพลีน (Polyhexafluoropropylene, PHFP)

เป็นฟลูออโรพอลิเมอร์ที่ผลิตเพื่อปรับปรุงความสามารถในการแปรรูป PHFP มีลักษณะโครงสร้างของหน่วยซ้ำ ดังนี้



ภาพที่ 12 พอลิเฮกซะฟลูออโรโพรไพลีน (Polyhexafluoropropylene, PHFP)

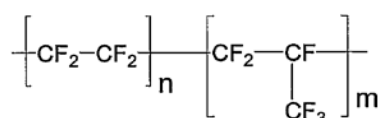
ที่มา : **Polyhexafluoropropylene**, accessed March 21, 2015, Available from

<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/295388?lang=en&region=TH>

พอลิเมอร์ชนิดนี้ มีสมบัติคล้าย PTFE แต่สามารถแปรรูปได้โดยกระบวนการแปรรูปพอลิเมอร์หลอมธรรมดาที่ใช้ในการแปรรูปเทอร์โมพลาสติกทั่วไป แต่พอลิเมอร์ชนิดนี้มีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งานบางประการ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาพอลิเมอร์ชนิดใหม่ เพื่อตอบสนองความต้องการ

### 1.3.14 ฟลูออรีเนเตด เอทิลีน โพรไพลีน (Fluorinated ethylene propylene (FEP) copolymer)

เป็นโคพอลิเมอร์ที่ผลิตจากปฏิกิริยาของเพอร์ฟลูออโรเอทิลีน (perfluoroethylene) กับเพอร์ฟลูออโรโพรไพลีน (perfluoropropylene) ซึ่งมีโครงสร้างของหน่วยซ้ำ ดังนี้



ภาพที่ 13 ฟลูออรีเนเตด เอทิลีน โพรไพลีน (Fluorinated ethylene propylene (FEP) copolymer)

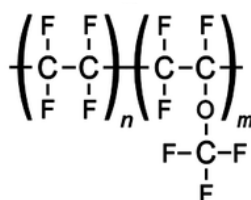
ที่มา : **Fluorinated ethylene propylene (FEP) copolymer**, accessed March 21, 2015, Available

from <http://www.google.com/patents/EP1667752A4?cl=en>

FEP มีสมบัติเด่นของฟลูออโรพอลิเมอร์ทุกประการ ใช้ FEP ในการผลิต ท่อสำหรับ กระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี ใช้เคลือบลูกกลิ้งที่ใช้ในเครื่องจักร และโรงงาน อุตสาหกรรม เคลือบภาชนะทนสารเคมี และทำฉนวนไฟฟ้า เป็นต้น

### 1.3.15 เพอร์ฟลูออโรอัลคอกซี (Perfluoroalkoxy (PFA))

PFA มีลักษณะ โครงสร้างของหน่วยซ้ำ ดังนี้



ภาพที่ 14 เพอร์ฟลูออโรอัลคอกซี (Perfluoroalkoxy (PFA))

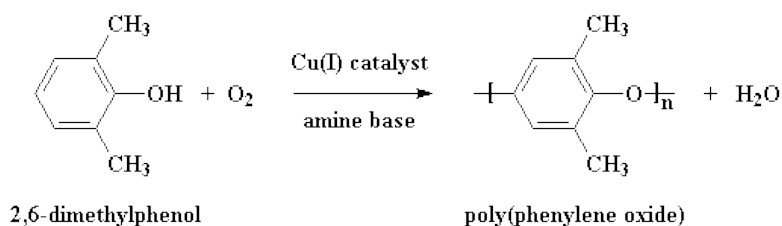
ที่มา : **Perfluoroalkoxy**, accessed March 21, 2015, Available from

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PFA\\_structure.PNG](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PFA_structure.PNG)

พอลิเมอร์ชนิดนี้สามารถแปรรูปได้โดยวิธีการหลอมเช่นกัน แต่มีสมบัติที่ติดกับวัสดุอื่นดีเยี่ยม จึงนิยมใช้ในการเคลือบเครื่องใช้ และอุปกรณ์ในอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังมีสมบัติการเป็น ฉนวนไฟฟ้า เนื้อต่อปฏิกิริยาเคมี และใช้งานที่อุณหภูมิสูงเช่นเดียวกับ PTFE (เจริญ นาคะสรรค์, 2545 : 71-79)

### 1.3.16 พอลิฟีนิลีนออกไซด์ (Polyphenyleneoxide, PPO)

บางครั้งเรียกพอลิเมอร์ชนิดนี้ว่า พอลิฟีนิลีนอีเทอร์ (polyphenyleneether, PPE) เนื่องจากมี หมู่ฟังก์ชันของอีเทอร์ (-O-) ในหน่วยซ้ำ เตรียมจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของโมโนเมอร์ คือ 2,6-ไดเมทิลฟีนอล โดยการเกิดปฏิกิริยาแบบออกซิเดชัน โดยใช้คะตะลิสต์ช่วย เกิดปฏิกิริยาและได้ ผลิตภัณฑ์ ดังนี้



ภาพที่ 15 พอลิฟีนิลีนออกไซด์ (Polyphenyleneoxide, PPO)

ที่มา : **Polyphenyleneoxide**, accessed March 21, 2015, Available from

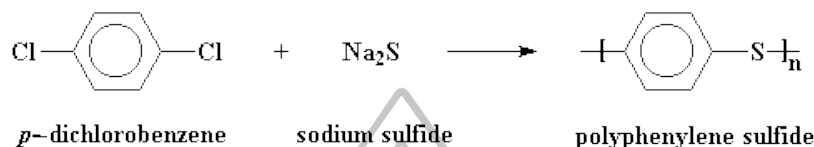
<http://pslc.ws/macrog/ppo.htm>

เนื่องจากการมีวงแหวนเบนซีน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง ทำให้ PPO มีค่า  $T_g$  ( $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) และ  $T_m$  ( $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) สูง เป็นพอลิเมอร์โซ่ตรงที่เป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน เนื่องจากการมีหมู่เมทิลเป็นหมู่เกาะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวได้ยาก มักจะใช้ PPO ในรูปที่เป็นพอลิเมอร์เบลนด์กับ PS หรือ HIPS เนื่องจาก PPO มีราคาแพง และทำการแปรรูปได้ยากมาก (เนื่องจาก  $T_m$  สูง และความหนืดของพอลิเมอร์หลอมสูงมาก) พอลิเมอร์เบลนด์ชนิดนี้ผสมเข้ากันได้ดีมาก สังเกตจากมีค่า  $T_g$  เพียงค่าเดียว เช่น ค่า  $T_g$  ที่อัตราส่วนการผสมเป็น 50:50 มีค่า  $T_g$  ประมาณ  $135\text{ }^{\circ}\text{C}$  พอลิเมอร์เบลนด์ของ PPO กับพอลิเมอร์ในกลุ่มสไตรีน มักจะมีชื่อเรียกว่า โมดิฟายด์พอลิฟีนิลีนออกไซด์ (Modified polyphenyleneoxide, MPPO) ซึ่งมีสมบัติเชิงกล เช่น มีความแข็งแรงสูง และการคืบที่อุณหภูมิต่างๆต่ำ มีความเหนียว และที่สำคัญคือ มีการคงทนของรูปทรงดีเยี่ยม ทั้งนี้จะเกี่ยวข้องกับการมีสัณฐานวิทยาแบบอสัณฐาน มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ และลดความชื้นต่ำ และมีความหนาแน่นต่ำที่สุดในบรรดาพลาสติกที่ใช้ในงานวิศวกรรม กล่าวคือ  $1.06$  เท่านั้น สมบัติที่สำคัญมากอีกประการหนึ่งของ MPPO คือ การทนทานต่อสารเคมี ทนทานต่อน้ำทั้งในสถานะน้ำร้อนและไอน้ำ ซึ่งชิ้นงานที่ผลิตจาก MPPO สามารถเข้าเครื่องเพื่อทำสเตอริไลซ์ซ้ำในเครื่องที่ใช้ไอน้ำได้ แต่ MPPO จะถูกทำให้เสื่อมสภาพได้โดยสารเคมีอินทรีย์ เช่น กรดแก่ และเบสแก่ และจะบวมตัวในตัวทำละลายอินทรีย์บางตัว

ประยุกต์ใช้ในการทำชิ้นงานที่จะนำไปใช้กับน้ำร้อนหรือไอน้ำ เช่น ทำวาล์ว ท่อ ปัม্ম ข้อต่อ มิเตอร์วัดการไหล สปอยเลอร์ ฝาครอบล้อ กรอบกระจกด้านนอกตัวรถ เครื่องเป่าลม และทำของใช้ทางการแพทย์ที่ต้องการสเตอริไลซ์ เป็นต้น

### 1.3.17 พอลิฟีนิลีนซันไฟด์ (Polyphenylenesulfide, PPS)

เตรียมจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรซ์แบบควบแน่นของโมโนเมอร์ คือ 1,4-ไดคลอโรเบนซีนกับโซเดียมซัลไฟด์ ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



ภาพที่ 16 พอลิฟีนิลีนซันไฟด์ (Polyphenylenesulfide, PPS)

ที่มา : **Polyphenylenesulfide**, accessed March 21, 2015, Available from

<http://pslc.ws/macrog/pps.htm>

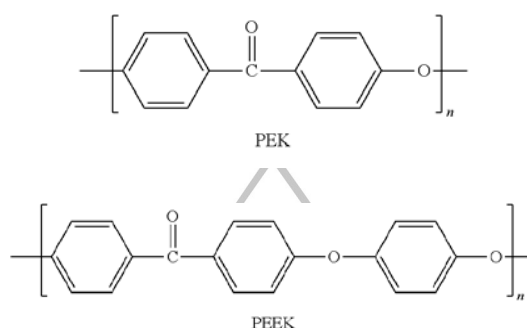
การมีวงแหวนเบนซีนในโครงสร้างหลัก ทำให้ PPS มีความแข็ง แต่เนื่องจากการไม่มีหมู่เกาะกะ ทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้สามารถเกิดผลึกได้ ในการแปรรูปถ้าใช้เข้าร้อนที่มีอุณหภูมิระหว่างค่า T<sub>g</sub> (88 °C) กับ T<sub>m</sub> (288 °C) จะมีระดับของผลึกประมาณ 15% เท่านั้น

PPS จัดเป็นพลาสติกที่ทนความร้อนได้สูงมาก กล่าวคือ สมบัติเชิงกลจะเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิสูงน้อยมาก และเกิดออกซิชั่นต่ำมาก อุณหภูมิการใช้งานสูงถึง 230 °C การทนทานต่อตัวทำละลายทุกชนิดดีเยี่ยม พบว่าไม่มีตัวทำละลายชนิดใดจะมีผลต่อสมบัติของ PPS ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 180 °C นอกจากนี้ PPS ทนต่อรังสี ทนต่อสภาวะอากาศ ทนไฟ เป็นฉนวนไฟฟ้า และไม่ถูกทำลายโดยคลื่นไมโครเวฟ

### 1.3.18 พอลิเอริลอีเทอร์คีโตน (Polyaryletherketone, PAEK)

เป็นกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีหน่วยซ้ำ ประกอบด้วยวงแหวนเบนซีนต่อหมู่อีเทอร์ (-O-) และคีโตน (R-CO-R) การมีหมู่เบนซีนและคีโตนใน โครงสร้างทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรง โมดูลัสสูงกว่าพอลิฟีนิลีนและพลาสติกวิศวกรรมชนิดอื่นๆ และทนต่อความร้อนสูงมาก พบว่า PAEK เป็นพอลิเมอร์ที่ทนต่อความร้อนสูงที่สุด การมีหมู่อีเทอร์ทำให้พอลิเมอร์หลอมได้ และสามารถแปรรูปโดยกระบวนการที่ใช้ในการแปรรูปเทอร์โมพลาสติกได้ การไม่มีหมู่เกาะกะบนโครงสร้างหลักทำให้พอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ เป็นพอลิเมอร์ชนิดกึ่งผลึก

บางครั้งเรียกพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ว่า คีโตนพอลิเมอร์ (Ketone polymers) ได้แก่ พอลิอีเทอร์คีโตน (Polyetherketone, PEK) พอลิอีเทอร์คีโตน (Polyetheretherketone, PEEK) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างของหน่วยซ้ำ ดังนี้

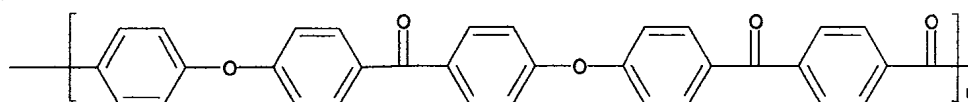


ภาพที่ 17 พอลิอีเทอร์คีโตน (Polyetherketone, PAEK) และพอลิอีเทอร์คีโตน (Polyetheretherketone, PEEK)

ที่มา : **Polyetherketone**, accessed March 21, 2015, Available from

<http://www.google.com/patents/US20110288244>

PEK มีหน่วยซ้ำที่มีหมู่คีโตนและหมู่อีเทอร์ต่อกับวงแหวนเบนซีน แต่กรณี PEEK จะมีหมู่อีเทอร์ 2 หมู่ และคีโตน 1 หมู่ต่อกับวงแหวนเบนซีน นอกจากนี้ยังมีพอลิเมอร์ในกลุ่ม PAEK ชนิดอื่นๆอีกหลายชนิด ที่เกิดจากการสลับหมู่อีเทอร์และหมู่คีโตน เพื่อให้เกิดการสมดุลระหว่างสมบัติการทนความร้อนสูงและความง่ายในการแปรรูป ตัวอย่างเช่น พอลิอีเทอร์คีโตนอีเทอร์คีโตนคีโตน (Polyetherketoneetherketoneketone, PEKEKK) ซึ่งมีโครงสร้างของหน่วยซ้ำ ดังนี้



ภาพที่ 18 พอลิอีเทอร์คีโตนอีเทอร์คีโตนคีโตน (Polyetherketoneetherketoneketone, PEKEKK)

ที่มา : **Polyetherketoneetherketoneketone**, accessed March 21, 2015, Available from

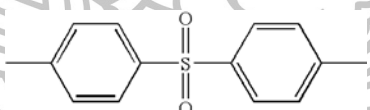
<http://www.google.com/patents/EP2145913B1?cl=en>

การแปรรูป PAEK ทำโดยการใช้เทคนิคการแปรรูปเทอร์พลาสติกหลอมทั่วไป แต่จะต้องให้ความร้อนแก่พลาสติกและตั้งอุณหภูมิเข้าสูงกว่าพลาสติกทั่วไป ตัวอย่างการแปรรูป เช่น การฉีดเข้าเบ้า การเอ็กซ์ทรูด เป็นแผ่นพลาสติก หรือฟิล์ม และเคลือบสายไฟ เป็นต้น

การประยุกต์ใช้งาน PAEK จะใช้ในงานในสถานะที่ทนความร้อนสูง สถานะที่มีสารเคมี สถานะที่ต้องการความแข็งแรงสูง ทนต่อการติดไฟและถ้าติดไฟจะมีควันไฟน้อย เช่น เคลือบสายไฟที่ใช้ในสถานะที่มีความสูง เช่น ในยานอวกาศ ในปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และในห้องเครื่องยนต์ของเครื่องบิน ทำข้อต่อสายไฟฟ้า แฉงวงจรไฟฟ้า ทำใบพัดบีบ วาล์ว ใช้กับสารเคมีที่ร้อนจัดหรือเย็นจัด เป็นต้น

### 1.3.19 พอลิซันโฟน (Polysulfone, PSU)

เป็นกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีหน่วยซ้ำประกอบด้วย หมู่ซันโฟน ( $-SO_2-$ ) ต่อกับวงแหวนเบนซีน ตั้งแต่ 2 หมู่ขึ้นไป การมีหมู่ซันโฟนในโครงสร้าง จะทำให้เพิ่มความแข็งและความแข็งแรงให้กับโมเลกุล เช่นเดียวกับกรณีการมีหมู่คีโตนใน PAEK การมีหมู่ซันโฟนประกอบกับการมีวงแหวนเบนซีน ทำให้พอลิซันโฟนทนต่อความร้อนและความแข็งแรงสูงมาก ลักษณะโครงสร้างของหน่วยซ้ำของพอลิซันโฟนที่ง่ายที่สุด แสดงดังนี้



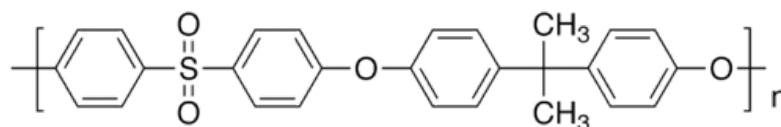
ภาพที่ 19 พอลิซันโฟน (Polysulfone, PSU)

ที่มา : **Polysulfone**, accessed March 21, 2015, Available from

<https://www.google.com/patents/US8110639>

พอลิซันโฟนชนิดที่มีโครงสร้างหน่วยซ้ำแบบนี้ จะไม่แสดงสมบัติการเป็นเทอร์โม-พลาสติก จะเกิดการหลอมพร้อมๆกับการสลายตัว ที่อุณหภูมิสูงกว่า  $500^{\circ}C$  จึงไม่สามารถใช้ประโยชน์โดยการแปรรูปโดยวิธีการที่ใช้กันโดยทั่วไปได้ จึงได้มีการพัฒนาโดยการเพิ่มหมู่ที่ให้ความยืดหยุ่นกับโครงสร้าง เช่น หมู่อีเทอร์ ( $-O-$ ) หรือหมู่เมทิลที่เป็นหมู่อิสระ เรียกว่า Udel มีโครงสร้างของหน่วยซ้ำ ดังนี้





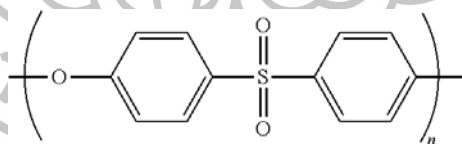
ภาพที่ 20 Udel

ที่มา : **Udel**, accessed March 21, 2015, Available from [http://en.wikipedia.org/wiki/4,4%27-Dichlorodiphenyl\\_sulfone](http://en.wikipedia.org/wiki/4,4%27-Dichlorodiphenyl_sulfone)

#### Dichlorodiphenyl\_sulfone

เนื่องจากมีส่วนของโมเลกุลของบิสฟีนอลเอ ใน โครงสร้างของหน่วยซ้ำ จึงเรียก พอลิซัน โฟนชนิดนี้อีกอย่างหนึ่งว่า พอลิบิสฟีนอลซัน โฟน (Polybisphenolsulfone, PBSU) ซึ่งมี หน่วยซ้ำประกอบด้วยหมู่เอเทอร์ 2 หมู่ หมู่เมทิลอิสระ 2 หมู่ และมีวงแหวนเบนซีน 4 หมู่ ถึงแม้ว่า พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นมากขึ้นกว่าเดิม แต่ยังคงมีความแข็ง และมีค่า Tg สูง คือประมาณ 190 °C เนื่องจากความเกะกะของโครงสร้าง ทำให้ PBSU เป็นพอลิเมอร์อสังฐาน มีความใส สมบัติเด่น อื่นๆของพอลิเมอร์ชนิดนี้ คือ ทนต่อการไฮโดรไลซิส ทนต่อสภาวะที่ทำกาการสเตอริไลซ์ โดยการใช้ ไอ้ น้ำ ทนต่อสารเคมี ทั้งน้ำมัน น้ำมันเครื่อง น้ำมันเบนซิน ผงซักฟอก แอลกอฮอล์ และตัวทำละลาย ชนิดต่างๆ นอกจากนี้ยังทนทานต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต ทนต่อการขีดไฟ

ตัวอย่างพอลิซัน โฟนอีกชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานสมรรถนะสูง คือ พอลิเอเทอร์ซัน โฟน (Polyethersulfone, PES) มีลักษณะโครงสร้างของหน่วยซ้ำ ดังนี้



ภาพที่ 21 พอลิเอเทอร์ซัน โฟน (Polyethersulfone, PES)

ที่มา : **Polyethersulfone**, accessed March 21, 2015, Available from

<http://www.google.com/patents/US20130062285>

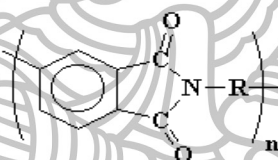
PES มี Tg สูงกว่า Udel กล่าวคือ มีค่าประมาณ 211 °C แต่สามารถแปรรูปได้โดยโดยใช้ เทคนิคการแปรรูปพอลิเมอร์หลอมทั่วไปได้ PES เป็นพอลิเมอร์อสังฐานเช่นกัน จึงมีสมบัติเด่น ด้านความใส มีความแข็งแรง ความเหนียว ความแข็ง มีการทนทานต่อการขีดดี สามารถใช้งานที่

อุณหภูมิสูงถึง 150 °C นอกจากนี้ยังทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิสูงได้ดี ทนทานต่อสารเคมี แต่อาจจะมีผลเสียเนื่องจากการสัมผัสกับเอสเทอร์ คีโตน หรือตัวทำละลาย อะโรมาติกส์บางชนิด ไม่ทนต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตจึงมักจะเคลือบด้วยวัสดุชนิดอื่น หากต้องการใช้งานในที่ที่มีแสงแดด

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน PES คือ ทำอุปกรณ์ของเตาอบ เครื่องเป่าผม เครื่องซักผ้า เครื่องอบผ้าแบบถังหมุน เครื่องทำความร้อน ส่วนประกอบของหลอดไฟวัตต์สูง วัสดุสะท้อนแสง เลนส์ไฟชนิดต่างๆ และอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ต้องการความใสและทนความร้อน เป็นต้น

### 1.3.20 พอลิอิมิด (Polyimide, PI)

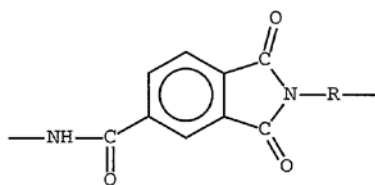
เป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซตที่ทนความร้อนสูงมากอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งในโครงสร้างของหน่วยซ้ำจะมีวงแหวนอิมิด (imide ring) หรือในบางครั้งเรียกว่า วงแหวนเฮเทอโรไซคลิก (heterocyclic ring) เนื่องจากการมีอะตอมของไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ลักษณะ โครงสร้างของวงแหวนอิมิด แสดงดังนี้



ภาพที่ 22 พอลิอิมิด (Polyimide, PI)

ที่มา : **Polyimide**, accessed March 21, 2015, Available from <http://pslc.ws/macrog/imide.htm>

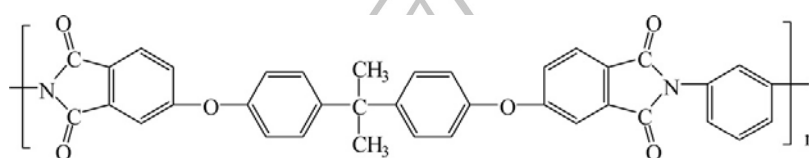
พอลิอิมิดกลุ่มแรกที่ผลิตเป็นเทอร์โมเซต ซึ่งยังมีการผลิตและใช้งานสมรรถนะสูง จนถึงปัจจุบัน ภายหลังจากได้มีการพัฒนา PI ที่เป็นเทอร์โมพลาสติก เพื่อให้สามารถแปรรูปได้โดยวิธีการที่ใช้กับเทอร์โมพลาสติกทั่วไป กล่าวคือ การฉีดเข้าเบ้า หรือเอ็กซ์ทรูด มีพอลิอิมิดที่สำคัญ 2 ชนิด ที่มีการผลิต และใช้งานสมรรถนะสูง คือ พอลิอิมิดอิมิด (Polyamideimide, PAI) พอลิเอเทอร์อิมิด (Polyetherimide, PEI) ซึ่งพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีลักษณะ โครงสร้างของหน่วยซ้ำ ดังนี้



ภาพที่ 23 พอลิเอไมด์อิมิด (Polyamideimide, PAI)

ที่มา : **Polyamideimide**, accessed March 21, 2015, Available from

<http://www.google.com/patents/EP1414906A1?cl=en>



ภาพที่ 24 พอลิอีเทอร์อิมิด (Polyetherimide, PEI)

ที่มา : **Polyetherimide**, accessed March 21, 2015, Available from

<http://en.wikipedia.org/wiki/Polyetherimide>

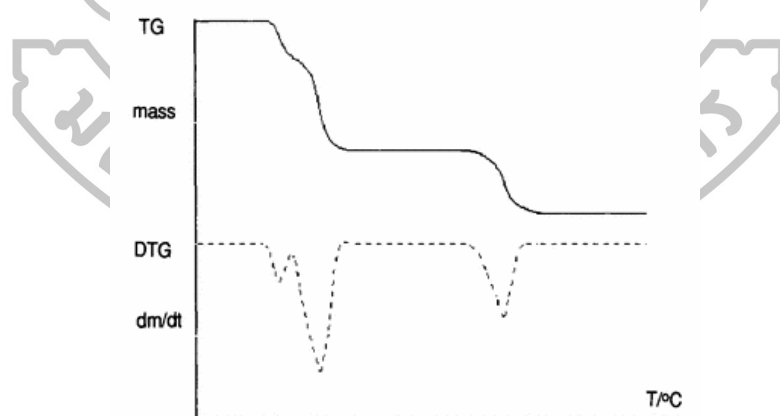
PAI มีหมู่เอไมด์ (-NHCO-) และหมู่อิมิดใน โครงสร้าง มีสมบัติเชิงกลดีเยี่ยม โดยเฉพาะ การทนทานต่อการกระแทกและการทนทานต่อการขีด จึงทำให้มีการคงทนต่อการเปลี่ยนแปลง รูปทรงดีมาก สามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิสูงถึง 275 °C มีความทนทานต่อตัวทำละลาย ไฮโดรคาร์บอน กรด ต่าง ที่อุณหภูมิสูง แต่จะไม่ทนต่อไอน้ำ และกรดบางชนิด เนื่องจากอิทธิพล ของการมีหมู่เอไมด์ในโครงสร้าง การแปรรูปใช้เทคนิคการฉีดเข้าเป้า ที่อุณหภูมิ 343 °C ใช้เบ้าร้อน 232 °C การประยุกต์ใช้งานมีการใช้งานในอุตสาหกรรมรถยนต์ การผลิตเครื่องบิน และยานอวกาศ (เจริญ นาคะสรรค์, 2545 : 79-86)

## 2. หลักการของเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

### 2.1 นิยามของเทอร์โมกราวิเมทรี

เทอร์โมกราวิเมทรี (thermogravimetry) เป็นเทคนิคที่ใช้ตรวจสอบมวลของสารตัวอย่าง เทียบกับเวลา หรืออุณหภูมิ โดยการตั้งโปรแกรมอุณหภูมิให้แก่สารตัวอย่างนั้นในบรรยากาศ เฉพาะตัว ส่วนใหญ่เรียกว่า การวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (thermogravimetric

analysis, TGA) ใช้อุปกรณ์ที่สำคัญคือเครื่องชั่งสารเชิงความร้อน (thermobalance) หรือเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (thermogravimetric analyzer) ถ้าต้องการระบุขั้นตอนของเส้นเคิร์ฟ TG ก็ใช้วิธีลากเส้นแบบอนุพันธ์ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยเพิ่มความถูกต้อง แม่นยำในการตรวจวัดและให้ข้อมูลการวิเคราะห์ในแง่จลนพลศาสตร์ ณ อุณหภูมิต่างๆ ได้เป็นอย่างดี เทคนิคนี้มักจะเรียกว่า “เดริเวทีฟ เทอร์โมกราวิเมตริก อะนาไลซิส” (derivative thermogravimetric analysis, DTG) ซึ่งหมายถึง การพล็อตอัตราการสูญเสียมวลเทียบกับเวลา ( $dm/dt$ ) ดังแสดงในภาพที่ 25 (ศักดิ์สิทธิ์ จันทร์ไทย, 2553 : 20-28) จุดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมวลในช่วงที่ทำการวิเคราะห์ก็จะทำให้  $dm/dt$  มีค่าเท่ากับศูนย์ และจะเกิดพีกของเส้นกราฟ DTG เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงมวลมีค่าสูงสุด ส่วนใหญ่มักจะวิเคราะห์พีก DTG ที่อุณหภูมิที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (peak maximum temperature,  $T_{max}$ ) และอุณหภูมิ onset (peak onset temperature,  $T_o$ ) เส้นกราฟ DTG สามารถนำมาใช้เพื่อแยกปฏิกิริยาที่ซ้อนทับกันได้ พื้นที่ใต้กราฟ DTG สัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงมวล ความสูงของพีกที่อุณหภูมิใดๆ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงมวลที่อุณหภูมินั้นๆ (สุนันท์ สายกระสุน, 2553 : 69-70)

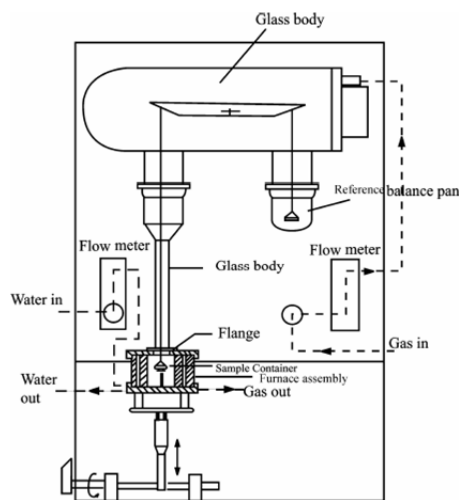


ภาพที่ 25 ลักษณะเส้นเคิร์ฟของ TG (เส้นทึบ) และ DTG (เส้นประ)

ที่ ม 1 : Haines, P.J. et al, **Principles of Thermal Analysis and Calorimetry** (Cambridge : The Royal Society of Chemistry, 2002)

## 2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

ในบรรดาเครื่องมือวิเคราะห์เชิงความร้อนทั้งหลาย เป็นระบบที่มีเครื่องชั่งไฟฟ้าเชื่อมโยงอยู่กับตำแหน่งของการเผาสารตัวอย่าง ซึ่งอาจเรียกกันง่ายๆ ว่าเป็นเครื่องชั่งเชิงความร้อน (thermobalance) ภาพที่ 26

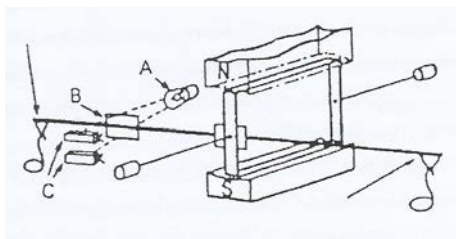


ภาพที่ 26 แผนภาพไดอะแกรมของระบบเครื่องชั่งความร้อน

ที่มา : Haines, P.J. et al, **Principles of Thermal Analysis and Calorimetry** (Cambridge : The Royal Society of Chemistry, 2002)

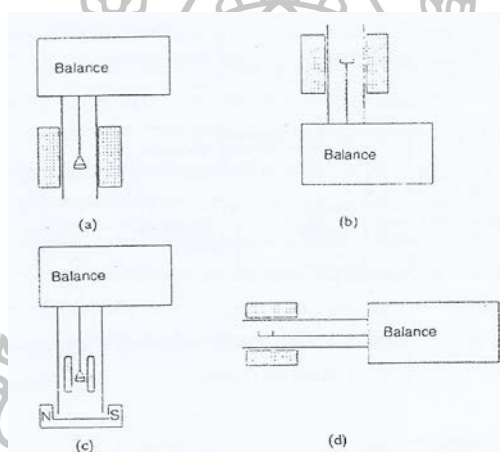
### 2.2.1 เครื่องชั่ง (Balance)

ภาพที่ 27 แสดงถึงเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กๆ ซึ่งมีคานน้ำหนักแขวนอยู่ในสนามแม่เหล็ก ตรวจวัดตำแหน่งแขนเครื่องชั่งด้วยเซ็นเซอร์ทางแสง (optical sensor) ถ้ามีการเพิ่มหรือลดน้ำหนัก จะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้แก่วัดลวดคานนั้น ขับเคลื่อนแขนเครื่องชั่งเข้าสู่ตำแหน่งเดิม เครื่องชั่งนี้ให้ค่ารีโซลูชันสูงถึง 1 ไมโครกรัมหรือดีกว่า ใช้ตัวอย่างหนัก 2-3 mg จนกระทั่งถึง 30 g หลีกเลี่ยงการสันเสี้อันเสถียรถ้าต้องการความไวสูงๆ การจัดเรียงเครื่องชั่งและเตาเผาแสดงในภาพที่ 28 โดยแสดงให้เห็นรูปทรงเรขาคณิตของการวางตำแหน่งต่างๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อผลการทดลอง



ภาพที่ 27 แผนภาพแสดง microbalance : A, lamp; B, Shutter; C, Photocells

ที่ ม ๑ : Haines, P.J. et al, **Principles of Thermal Analysis and Calorimetry** (Cambridge : The Royal Society of Chemistry, 2002)



ภาพที่ 28 การจัดเรียงเครื่องชั่งความร้อนที่แสดงถึงเตาเผา (ที่บัสแสง) ตำแหน่งสารตัวอย่างและที่วางสาร: (a) และ (c) เป็นแบบแขวน; (b) เป็นแบบตั้งขึ้น; (d) เป็นแบบแนวนอน ตำแหน่งแม่เหล็กสำหรับปรับมาตรฐานที่จุดคูรีแสดงในรูป (c)

ที่ ม ๑ : Haines, P.J. et al, **Principles of Thermal Analysis and Calorimetry** (Cambridge : The Royal Society of Chemistry, 2002)

ส่วนใหญ่แล้ว ปัญหาที่อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องชั่งกับเตาเผา คือจะมีแก๊สที่ก่อให้เกิดการผุกร่อนหรือการออกซิไดซ์อยู่ใกล้กับกลไกเครื่องชั่ง จึงปล่อยแก๊สเฉื่อย ( $N_2$ ) เข้าในเครื่องชั่ง ณ อุณหภูมิห้อง มีปัญหาเรื่องไฟฟ้าสถิตย์ซึ่งทำให้เกิดแรงดึงดูดของภาชนะใส่สารตัวอย่างที่มีต่อภาชนะแก้วที่ใช้อยู่ นั่น แก้ว โดยการเคลือบผิวภาชนะด้วย conducting film หรือใช้

antistatic spray มีปัญหาเกี่ยวกับอิทธิพลการพาความร้อน (convection effect) ที่มีต่อการเคลื่อนที่ของแก๊สรอบๆ สารตัวอย่าง อาจก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน (noise) แล้วส่งผลกระทบต่อมวลที่ตรวจวัดได้ขนาดนั้น อย่างไรก็ตาม สามารถแก้ไขโดยการปล่อยบรรยากาศเข้าในช่องใส่สารตัวอย่างและออกแบบอุปกรณ์ให้เหมาะสมยิ่งขึ้น

เมื่อเครื่องชั่งทำงานในสภาวะที่มีความดันต่ำๆ อาจมีการไหลเวียนของโมเลกุลในสภาวะร้อน (thermomolecular flow) เกิดขึ้นได้ ถ้าสารตัวอย่างหรือที่แขวนสารตัวอย่าง หรือจุดสัมผัสบริเวณใดก็ตามที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไปเรื่อยๆ ที่ความดันต่ำๆ นั้น เมื่อเส้นทางวิ่งอิสระโดยเฉลี่ย (mean free path) มีค่าใกล้เคียงกับมิติของอุปกรณ์ที่ใช้ การไหลของโมเลกุลแก๊สก็ทำให้มวลเปลี่ยนแปลงได้ เช่น เมื่ออุณหภูมิต่างกันประมาณ 100 K ความดันประมาณ  $10^{-1}$  ทอร์ อาจส่งผลกระทบได้มากถึง 100 ไมโครกรัม

ถ้าสารตัวอย่างมีปริมาตรมากๆ จะมีผลเนื่องจากหลักของอาร์คิมิดีส (Archimedes) คือเมื่อจุ่มวัตถุลงในของเหลวก็จะเกิดการแทนที่มวลเท่ากับของเหลวที่ล้นออกมา ถ้าให้  $V$  ( $\text{cm}^3$ ) คือปริมาตรของสารตัวอย่างและภาชนะที่ใช้บรรจุ  $P$  (Pa) คือความดัน และ  $m$  คือมวลของแก๊สอุดมคติที่มีมวลโมเลกุล  $M$  ณ อุณหภูมิ  $T$  ได้

$$m = MPV/RT$$

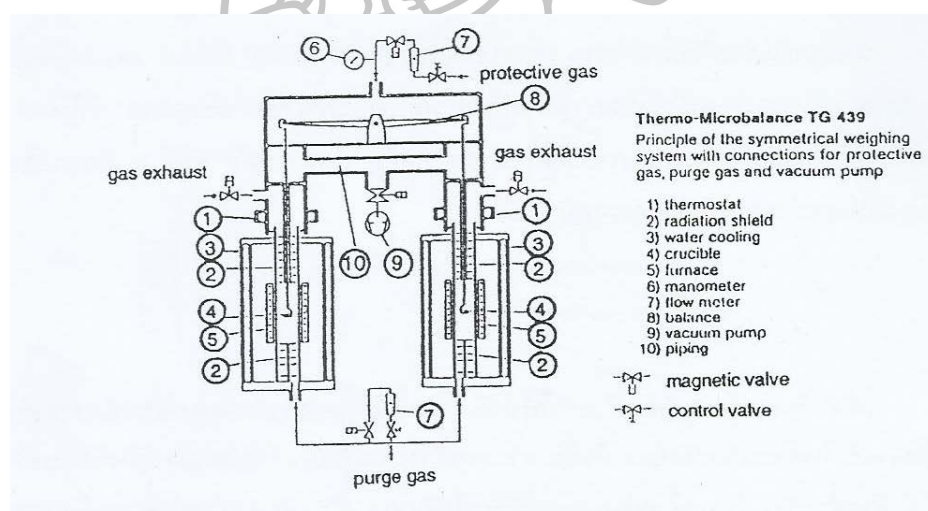
เมื่อให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างทำให้ความหนาแน่นของแก๊สลดลง ขณะที่ความหนาแน่นของของแข็งไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง ดังนั้น แรงพยุงตัวจะลดลงแล้วทำให้สารตัวอย่างมีน้ำหนักตามที่วัดได้ ตัวอย่างเช่น ถ้าสารตัวอย่างและครุชเชิลมีปริมาตร  $V$   $1\text{cm}^3$  ( $10^{-6}\text{m}^3$ ) ความดันบรรยากาศประมาณ  $10^5$  Pa,  $N_2$  ( $M = 0.028\text{ kg}$ ) ค่า  $R = 8.314\text{ J/(K.mol)}$  ฉะนั้นแรงลอยตัว (buoyancy) จะเปลี่ยนไปประมาณ 0.8 mg ระหว่าง 300 K และ 1000 K ดังนั้นทำให้ปรากฏมวล 0.8 mg แก้ไขได้ดังนี้

- 1 ให้ทำการวิเคราะห์เส้นเคิร์ฟของแรงลอยตัว (buoyancy curve) ของแบบลค์ก่อนโดยใช้สารเฉื่อยที่มีปริมาตรเดียวกัน แล้วหักลบจากเส้นเคิร์ฟของสารตัวอย่าง

2. เลือกใช้สารตัวอย่างปริมาณน้อยๆ และครุชชีเบลขนาดเล็กลง ถ้าปริมาตรลดลงถึง  $2.8 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$  เทียบได้เท่ากับ 10 mg ของ MgO แสดงว่าค่าน้ำหนักที่วัดได้จะประมาณ 2.2 ไมโครกรัมเท่านั้น

3. ถ้าใช้ระบบเตาคู่ แล้วใช้จุดถ่วงคู่ (counterpoise) ปริมาตรเท่ากันได้รับความร้อนเวลาเดียวกัน ก็สามารถลดผลกระทบอันนี้ได้ค่อนข้างมาก

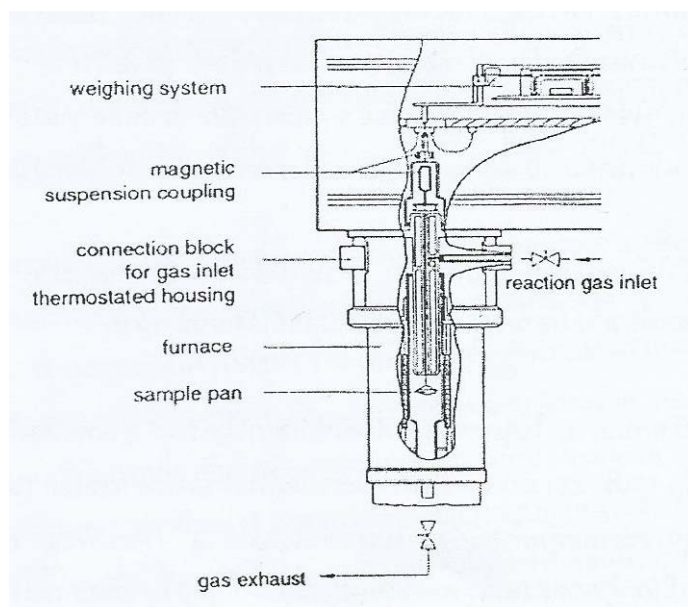
ถ้าใช้เทคนิค TG ในบรรยากาศที่ก่อให้เกิดการสุกหรืออบ อาจทดลองในเครื่องชั่งที่แขวนในสนามแม่เหล็ก (ภาพที่ 29) แม่เหล็กไฟฟ้าที่แขวนอยู่ในเครื่องชั่งขนาดเล็ก (microbalance) จะเป็นแท่งแม่เหล็กถาวรซึ่งห่อหุ้มด้วยแก้วอยู่ในเซลล์ที่ใช้ตรวจวัด (measuring cell) สารตัวอย่างในเตาเผาจะต่อเชื่อมด้วยขดลวดเข้ากับตัวแม่เหล็กนั้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมวลเกิดขึ้นก็จะส่งผลกลับไป ระบบนี้ใช้ได้กับสถานะที่มีบรรยากาศที่ไวต่อปฏิกิริยา หรือสารตัวอย่างที่ปล่อยผลิตภัณฑ์ที่ก่อให้เกิดการสุกหรือเป็นพิษ โดยไม่รบกวนกลไกของเครื่องชั่งแต่อย่างใด



ภาพที่ 29 ไดอะแกรมแสดงเครื่องชั่งความร้อนขนาดเล็กๆ แบบสมมาตร

ที่ ม 1 : Haines, P.J. et al, **Principles of Thermal Analysis and Calorimetry** (Cambridge : The Royal Society of Chemistry, 2002)





ภาพที่ 30 ไดอะแกรมของเครื่องชั่งความร้อนขนาดเล็กๆ ที่แขวนในสนามแม่เหล็ก

ที่ ม ๑ : Haines, P.J. et al, **Principles of Thermal Analysis and Calorimetry** (Cambridge : The Royal Society of Chemistry, 2002)

### 2.2.2 โปรแกรมเมอร์ (Programmer)

ในการใช้เทอร์โมคัปเปิลหรือคู่ควบคุมความร้อน (thermocouple) สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิของเตาเผา นั้น โดยทั่วไปแล้ว เลือกใช้คู่โลหะ Pt-Pt/Rh 13% วัดอุณหภูมิได้สูงถึง 1600 °C ชนิดนี้ค่อนข้างเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี ให้ผลลัพท์ค่อนข้างต่ำประมาณ 8-12  $\mu\text{V/K}$  หรือใช้โครเมล-อะลูเมล (chromel-alumel) ซึ่งวัดได้ประมาณ 1100 °C ตอบสนองได้สูงกว่าคือ ประมาณ 40  $\mu\text{V/K}$  แต่จะถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายกว่า โดยส่งสัญญาณจากเตาเผาหรือระบบควบคุมไปยังโปรแกรมเมอร์ แล้วเทียบอุณหภูมิได้ตามที่ต้องการ ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไป ระบบจะตอบสนองโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าให้เตาเผามากขึ้น และถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปก็จะค่อยๆ ปรับลดกำลังไฟลง มีการกำหนดเวลาตอบสนองของหน่วยควบคุมและเตาเผาให้อยู่ในกรอบของความต่างอุณหภูมิ หรือช่วงพร่องความร้อน (thermal lag) ของเครื่องมือ แล้วจึงกำหนดช่วงของอัตราการเพิ่มความร้อนให้เหมาะสมต่อไป ถ้าใช้โปรแกรมควบคุมแบบที่มีเวลาตอบสนองอย่างช้าๆ กับเตาเผาขนาดใหญ่ อาจใช้อัตราการเพิ่มความ

ร้อนต่ำกว่า 10 K/min ได้ ขณะที่เตาเผาขนาดเล็กและใช้ระบบควบคุมเร็วขึ้นจะช่วยเพิ่มอัตราการให้ความร้อนได้สูงถึง 100 K/min

### 2.2.3 สารตัวอย่าง (Sample)

เครื่อง TG ใช้วิเคราะห์สารตัวอย่างที่เป็นของแข็งเป็นส่วนใหญ่ ถ้าเป็นสารบริสุทธิ์หรือสารประกอบที่เป็นเนื้อเดียวกันก็วิเคราะห์ได้ผลค่อนข้างง่าย แต่ถ้าสารตัวอย่างนั้นมีปริมาณมาก ๆ ซึ่งอาจแตกต่างกันบ้างในส่วนต่างๆของตัวอย่าง ก็จะมีปัญหายุ่งยากมากขึ้น อาจเลือกใช้วิธีการสุมตัวอย่างแบบรูปกรวยและภาคตัดเลี้ยว  $\frac{1}{4}$  (coning & quartering) ถ้าสารตัวอย่างนั้นผ่านการบดละเอียดมาแล้ว ทำให้ผลการวิเคราะห์หามีค่าซ้ำที่ดีและเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยไปบ้างเพียงเล็กน้อย แต่มักพบอยู่เสมอว่า ยังมีความแตกต่างกันระหว่างสารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ห้อยู่มากพอสมควร เช่น บางส่วนมีความพรุนสูง หรือถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย หรือมีความชื้นสูงกว่าส่วนอื่นๆ โดยรวมผลึกของสารตัวอย่างที่แสดงพฤติกรรมต่างจากสารตัวอย่างที่เป็นผงละเอียด โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อาจเป็นพอลิเมอร์โมพลาสติก (thermoplastics) เป็นต้น

ปกติแล้ว สารตัวอย่างควรมีขนาดเล็กๆ เป็นผงละเอียดและกระจายตัวได้ดี แม้ว่าจะอยู่ใน crucible ก็ตาม ตัวอย่างเช่น เมื่อทำการวิเคราะห์สารด้วย TG ภายใต้สภาวะการทดลอง ดังนี้

Sample :  $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Crucible : Pt pan

Rate : 10 K/min

Atmosphere :  $\text{N}_2$ , 20  $\text{cm}^3/\text{min}$

Mass : 10.5 mg

### 2.2.4 การปรับมาตรฐานอุณหภูมิ (Temperature calibration)

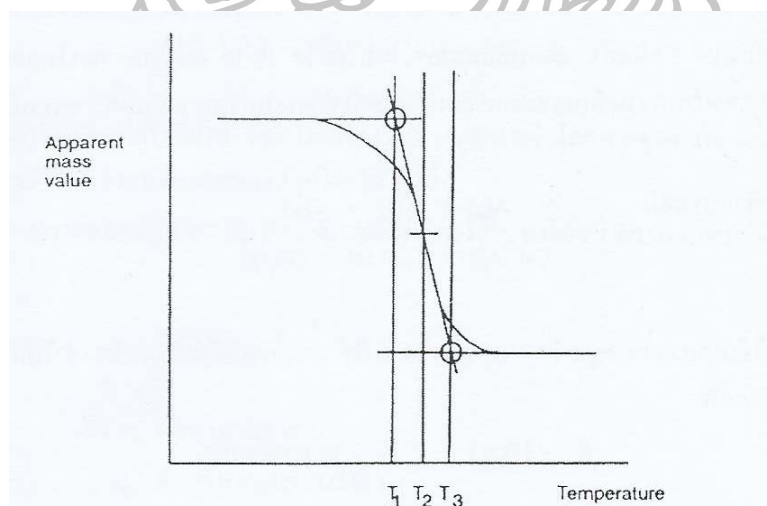
ปกติแล้วจะใช้เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) ชนิดเดียวกันวัดอุณหภูมิที่สารตัวอย่างและที่เตาเผา อาจมีช่วงพ่องความร้อน (thermal lag) อยู่บ้าง ทั้งนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ (ไม่ใช่แบบการให้อุณหภูมิคงที่) ชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น บรรยากาศในเตาเผา อัตราการให้ความร้อน และรูปร่างของระบบ โดยเลือกใช้วัสดุต่างๆ เพื่อนำมาใช้ปรับอุณหภูมิมาตรฐานของเครื่องชั่งเชิงความร้อน (thermobalance) ได้แก่ โลหะและโลหะเจือ (alloys) ทั้งนี้เนื่องจากพวกโลหะจะมีสมบัติ

ความเป็นแม่เหล็ก (ferromagnetic) ที่อุณหภูมิต่างๆ จึงมีโอกาสสูญเสียความเป็นแม่เหล็กได้ และจะหมดสภาพแม่เหล็กเมื่อถึงจุดคูรี (Curie point) ดังแสดงในภาพที่ 31 สำหรับวิธีการปรับค่ามาตรฐานอุณหภูมิของเครื่องมือวิเคราะห์เชิงความร้อน มีดังต่อไปนี้

1) ใส่วัสดุแม่เหล็กลงในภาชนะใส่สารตัวอย่างซึ่งมีแท่งแม่เหล็กวางอยู่ด้านล่าง แรงแม่เหล็กที่กระทำต่อวัสดุนั้นจะทำให้มวลมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย TG ในบรรยากาศ  $N_2$  แรงแม่เหล็กจะหายไปทันที ณ จุดคูรี นอกจากนี้อาจใช้อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลาง หรือที่ขอดพีคของเส้นเคิร์ฟ DTG ก็ได้เป็นตัวกำหนดจุดปรับค่ามาตรฐาน โดยอาศัยวัสดุตามมาตรฐานของ NIST (ตารางที่ 1)

2) วิธีปรับค่ามาตรฐาน ให้ใช้เส้นลวดที่เป็นวัสดุซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงๆ และทราบค่า  $T_m$  วางให้สัมผัสกับภาชนะใส่สารตัวอย่าง ลวดเส้นนี้จะหลุดออกเมื่อเกิดการหลอมเหลว

3) เลือกปฏิกิริยาที่ทราบแน่ชัดว่าให้อุณหภูมิพีคของ DTG ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการใช้อุปกรณ์อื่นที่ได้ปรับค่ามาตรฐานมาแล้ว



ภาพที่ 31 เส้นเคิร์ฟแสดงจุดคูรีที่ได้จากการจัดเรียงอุปกรณ์ในภาพที่ 28 เมื่อเลือกใช้โลหะนิเกิล

จะให้ค่า  $T_1$  351.4 °C;  $T_2$  352.8 °C;  $T_3$  354.4 °C  $T_2$  คือค่าใช้ปรับมาตรฐาน ณ จุดคูรี

ที่ ม ๑ : Haines, P.J. et al, **Principles of Thermal Analysis and Calorimetry** (Cambridge : The Royal Society of Chemistry, 2002)

ตารางที่ 1 จุดคูรีที่ใช้ปรับมาตรฐานของสารตัวอย่างใน TG

สารตัวอย่าง	$T_{ci}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
Permanorm 3	259
Nickle	353
Mumetal	381
Permanorm 5	454
Trafoperm	750

ที่ ม 1 : Haines, P.J. et al, **Principles of Thermal Analysis and Calorimetry** (Cambridge : The Royal Society of Chemistry, 2002)

### 2.2.5 บรรยากาศ (Atmosphere)

เมื่อวิเคราะห์สารด้วยเทคนิค TG ซึ่งมีกระแสแก๊สไหลผ่านอยู่นั้น ถ้าใช้อัตราการไหลสูงๆ จะรบกวนกลไกเครื่องชั่ง แต่ถ้าใช้อัตราการไหลต่ำๆ อาจไม่ช่วยขจัดแก๊สผลิตภัณฑ์ หรือแก๊สของสารเริ่มที่ใช้ ปกติแล้วเลือกใช้อัตราการไหลในช่วง  $10\text{-}30\text{ cm}^3/\text{min}$  การไหลของแก๊สจะช่วยเพิ่มค่าการส่งผ่านความร้อนและขนถ่ายผลิตภัณฑ์ไปยังระบบวิเคราะห์แก๊สด้วยเทคนิคอื่นๆ ได้

ตัวอย่างเช่น



ใช้บรรยากาศ  $\text{N}_2$  ขจัด  $\text{CO}_2$  ออกไป ถ้าใช้  $\text{CO}_2$  ผ่านเข้าไปแทนก็จะทำให้ค่า  $K_p$  จะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จากสมการของวานท์ฮอฟฟ์ (van't Hoff)

$$\ln(K_p) = -\Delta H^\circ/RT + \text{constant}$$

ดังนั้น ความดัน ณ ภาวะสมดุลของ  $\text{CO}_2$  จึงมีค่ามากขึ้น ถ้าใช้  $P_{\text{CO}_2}$  สูงๆ ถ้ามีสารตัวอย่างอยู่อย่างจำกัดก็ทำให้บรรยากาศรอบๆ นั้นเกิดขึ้นได้เอง เรียกว่า Self-generated atmosphere จึงเสมือนว่าเป็นผลของการให้ความดันภายนอกสูงๆ นั้นเอง ก็ควรทำให้สารตัวอย่างกับแก๊สที่อยู่ในบริเวณรอบๆ นั้นสัมผัสกันอย่างทั่วถึง ก็ควรทำให้สารตัวอย่างแผ่กระจายบางๆ บนพื้นผิวภาชนะ

หรือใช้ภาชนะที่มีรูพรุนหรืออาจจะเป็น gauze container แต่ต้องแน่ใจว่าภาชนะนั้นเฉื่อยต่อสารตัวอย่างและแก๊สนั้นด้วย (ศักดิ์สิทธิ์ จันทน์ไทย, 2553 : 20-28)

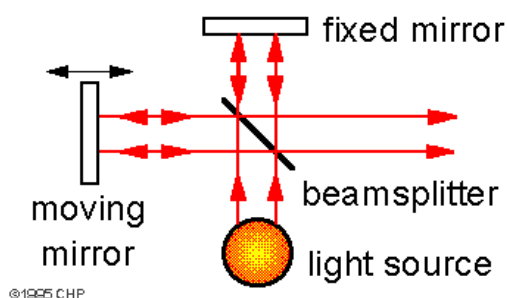
### 3. หลักการของเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีเป็นเทคนิคที่ใช้หาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ โดยอาศัยรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีเลขคลื่น อยู่ในช่วงประมาณ  $12,800$  ถึง  $10 \text{ cm}^{-1}$  หรือมีช่วงความยาวคลื่นจาก  $0.78$  ถึง  $1,000 \mu\text{m}$  (แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ, 2553 : 108-109) เทคนิคนี้ใช้ในการศึกษาโครงสร้างและพันธะของสารประกอบอินทรีย์ที่โมเลกุลมีพันธะแบบโคเวเลนต์และมีการเปลี่ยนโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ในโมเลกุลเนื่องจากการสั่น (vibration) หรือการหมุน (rotation) วิธีนี้ใช้ศึกษาตัวอย่าง ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส (นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, 2547)

FTIR เป็นเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีที่ใช้ อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Michelson Interferometer) ในการทำหน้าที่แยกแสงที่ผ่านออกจากเซลล์บรรจุสารตัวอย่างออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆ (แทนที่การใช้โมโนโครมาเตอร์ในกรณีของเครื่องมืออินฟราเรดแบบดิสเพอร์ซีฟหรือแบบลำแสงคู่)

สำหรับในอุปกรณ์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์นั้น จะประกอบไปด้วยกระจกแบนราบ (planar mirrors) 2 แผ่นที่วางทำมุมตั้งฉากกัน โดยจะมี 1 แผ่นวางอยู่กับที่ (fixed mirror) ในขณะที่กระจกอีกหนึ่งแผ่นจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาด้วยความเร็วคงที่ ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของผิวกระจกดังกล่าว (หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเคลื่อนที่ขนานกับกระจกอีกแผ่นที่อยู่กับที่)

นอกจากนี้ยังมีตัวแยกลำแสง (beam splitter) ซึ่งวางทำมุม  $45$  องศา อยู่ระหว่างกระจกทั้งสอง ซึ่ง beam splitter นี้จะทำหน้าที่แบ่งแยกลำแสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงให้แยกออกเป็นสองส่วน กล่าวคือ  $50\%$  ของลำแสงจะทะลุผ่าน beam splitter เข้าไปสู่ fixed mirror ในขณะที่อีก  $50\%$  ของลำแสงที่เหลือจะหักเหไปสู่กระจกที่เคลื่อนที่



ภาพที่ 32 แสดงการทำงานของ interferometer

ที่มา : **interferometer**, accessed March 22, 2015. Available from

<http://elchem.kaist.ac.kr/vt/chem-ed/optics/selector/michelso.htm>

สำหรับอุปกรณ์ beam splitter นี้ จะประกอบไปด้วยฟิล์มของโลหะ (เช่น  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Ge) บางที่เคลือบอยู่บนผิวของวัสดุรองรับ เช่น quartz, KBr, CsI เป็นต้น (ตารางที่ 2)

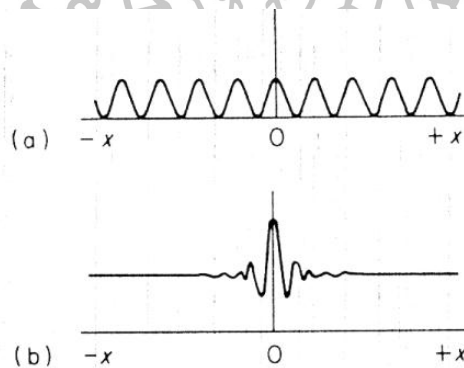
นอกจากนั้นหากสังเกตให้ดีจะพบว่าบริเวณด้านล่างของ beam splitter จะมีตัวชดเชย (compensator) ซึ่งเป็นแผ่นวัสดุที่มีความหนาเป็น 2 เท่าของแผ่น beam splitter และจะทำหน้าที่ปรับหรือชดเชยระยะความยาวเส้นทางการเดินทางของแสง (optical path length) ทั้ง 2 แขนให้เท่ากัน

ตารางที่ 2 แสดงตัวอย่างของวัสดุที่ใช้ทำ window cells สำหรับเทคนิค FTIR

สารเคลือบ	วัสดุฐานรอง	ช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม ( $\mu\text{m}$ )
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Quartz	0.65-2.5
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaF	1.0-5.0
Ge	KBr	2.7-25.0
Ge	CsI	10.0-50.0

ผลจากการแยกแสงและการสะท้อนของแสงในลักษณะดังกล่าวจะทำให้รูปแบบของคลื่นแสงที่จะเข้าสู่ดีเทคเตอร์ถูกรบกวนให้เปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้ทั้งนั้นขึ้นอยู่กับระยะทางของกระจกที่เคลื่อนที่ moving mirror (หรือระยะ  $x$ ) ด้วย (หรือขึ้นอยู่กับเวลาเนื่องจากกระจกเดินทางด้วยความเร็วคงที่)

ในกรณีที่แสงที่เข้ามาสู่อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เป็นแสงที่มีความถี่เดียว (หรือมีความยาวคลื่นค่าเดียว ซึ่งเรียกว่า mono-chromatic light) แสงที่ผ่านออกจากอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Interferogram) จะมีลักษณะ ดังรูปซึ่งประกอบไปด้วยจุดสูงสุดของคลื่น (maximum) ซึ่งเกิดจากการที่แสงที่เดินทางสะท้อนกลับมาจากกระจกทั้ง 2 มีช่วงคลื่นตรงกัน (in phase) และจุดต่ำสุดของคลื่น (minimum) ซึ่งเกิดจากการที่แสงที่เดินทางกลับมาจากกระจกทั้ง 2 มีช่วงคลื่นที่ไม่ตรงกัน (out of phase) ซึ่งในกรณีนี้จะพบว่าที่ระยะทาง  $x$  ใดๆ ก็ตาม แสงที่ได้จะมีความถี่คงที่ แต่ในกรณีที่แสงที่เดินเข้าสู่อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เป็นแสงที่มีหลายความถี่หรือหลายความยาวคลื่น (polychromatic light หรือ broadband light source) แสงที่เกิดจากการรวมกันเพื่อจะออกไปสู่ดีเทคเตอร์ (Interferogram) นั้นจะถูกแยกออกเป็นความถี่ต่างๆ ขึ้นอยู่กับระยะทาง  $x$  (ดังภาพที่ 33)



ภาพที่ 33 การแทรกสอดของลำแสงที่สะท้อนกลับในกรณีที่เป็นแสงความถี่เดียวและแสง polychromatic (แมน อมรสิทธิ์ และคณะ, 2553)

ซึ่งสัญญาณของแสงที่รวมกันใหม่เพื่อจะเข้าสู่ดีเทคเตอร์ในลักษณะนี้มีลักษณะเป็น time domain (หรือกราฟคลื่น sine wave ที่สัมพันธ์กับแกนระยะทางหรือเวลา เนื่องจากกระจกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่) จะถูกถอดรหัสหรือแปลงไปเป็น frequency domain หรือกราฟที่สัมพันธ์กับแกนความถี่ โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Fourier transform ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการแปลงจะถูกนำไปเขียนเป็นสเปกตรัมอินฟราเรด (กราฟระหว่างปริมาณความเข้มของแสงกับความถี่หรือเลขคลื่น) ต่อไป

ข้อดีของเทคนิคฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด คือ มีความรวดเร็วในการวิเคราะห์ (เมื่อเทียบกับการใช้ grating ในการแยกแสงแบบเดิม) โดยจะใช้เวลาในการวิเคราะห์ไม่นาน (วินาที)

ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินฟราเรดแบบลาแสงคู่หรือแบบดิสเพอร์ซีฟ (dispersive IR) จะใช้เวลาหลายนาที

### หลักการดูดกลืนคลื่นแสงอินฟราเรดของโมเลกุลสารอินทรีย์

ช่วงคลื่นอินฟราเรด (0.78-1000  $\mu\text{m}$ ) อยู่ระหว่างช่วงคลื่นวิทยุและช่วงคลื่นไมโครเวฟ (เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีนิยมใช้หน่วยความยาวคลื่นเป็นจำนวนคลื่นหรือเลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ ) หรือ wavenumber) ช่วงคลื่นอินฟราเรดแบ่งย่อยออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้ ตารางที่ 3 ช่วงคลื่นอินฟราเรด

ช่วงคลื่น	ช่วงความยาวคลื่น ( $\mu\text{m}$ )	จำนวนคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )
อินฟราเรดย่านใกล้ (near IR, NIR)	0.78-2.5	12800-4000
อินฟราเรดย่านกลาง (mid or fundamental IR)	2.5-50	4000-200
อินฟราเรดย่านไกล (far IR)	50-1000	200-10

ช่วงคลื่นอินฟราเรดที่ถูกนำมาใช้มากจะอยู่ในช่วง  $4000-670 \text{ cm}^{-1}$  สำหรับช่วงคลื่นอินฟราเรดย่านกลางจะให้แถบการดูดกลืน (absorption bands) ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของหมู่ฟังก์ชัน และข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างโมเลกุล ช่วงคลื่นอินฟราเรดมีพลังงานไม่พอเพียงที่จะทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลเกิดแทรนซิชันได้ แต่ทำให้เกิดการแทรนซิชันของการสั่นของโมเลกุล สเปกตรัมที่ได้มีลักษณะเป็นแถบที่แคบ และอยู่ใกล้กันมาก หรือมีการซ้อนเหลื่อมกันของสเปกตรัม อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดแทรนซิชันระหว่างระดับพลังงานของการสั่น ต้องมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของการหมุนด้วยเสมอ ดังนั้นจึงไม่ค่อยเห็นสเปกตรัมของการสั่นอย่างเดี่ยว (pure vibrational spectrum) แต่อาจเห็นสเปกตรัมการหมุนอย่างเดี่ยวได้ (pure rotational spectrum) เพราะช่วงกว้างระหว่างระดับพลังงานของการหมุนน้อยกว่าของระดับพลังงานการสั่นมาก สำหรับสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง และของเหลวเกิดการสั่นตลอดเวลาจึงให้อินฟราเรดสเปกตรัมได้ แต่ไม่ให้ไมโครเวฟสเปกตรัมของของแข็งและของเหลวเพราะโมเลกุลหมุนได้น้อย



การดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดของโมเลกุลนั้นมีข้อกำหนดที่สำคัญ 2 ประการ ดังนี้

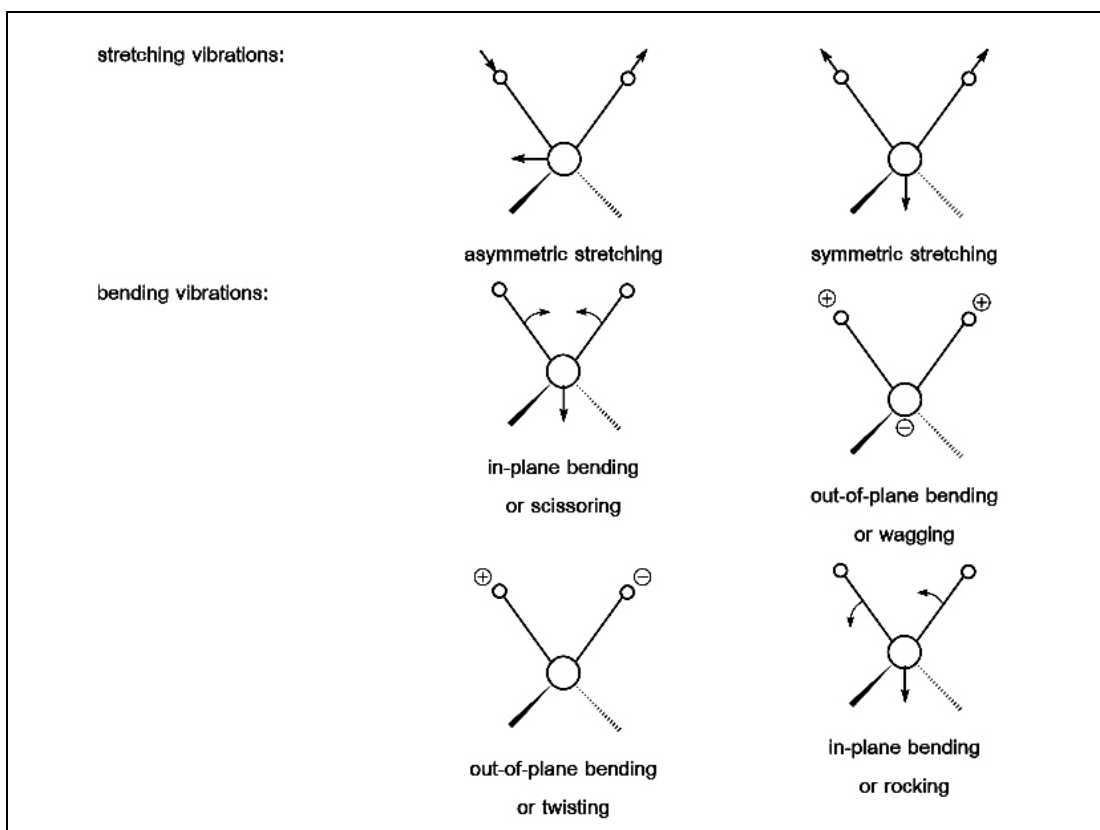
1. โมเลกุลที่กำลังสั่นนั้นต้องเกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ภายในโมเลกุล ดังนั้นโมเลกุลที่ประกอบด้วยสองอะตอมที่เหมือนกัน เช่น  $N_2$ ,  $O_2$  และ  $Cl_2$  จะไม่ให้อินฟราเรดสเปกตรัม

สรุปได้ว่า การที่โมเลกุลใดๆ จะดูดกลืนช่วงคลื่นแสงอินฟราเรดได้นั้นจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ในระหว่างที่โมเลกุลนั้นเกิดการสั่น ดังนั้นโมเลกุลของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ความหนาแน่นของประจุ (charge density) แตกต่างกันระหว่างอะตอมทั้งสองจะให้แถบดูดกลืนคลื่นแสงอินฟราเรดได้ เรียกโมเลกุลเหล่านี้ว่า IR-active สำหรับโมเลกุลที่ประกอบด้วยสองอะตอมที่เหมือนกันจึงไม่มีความแตกต่างของความหนาแน่นของประจุ การสั่นของโมเลกุลดังกล่าวจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ จะไม่ให้แถบดูดกลืนคลื่นแสงอินฟราเรด เรียกโมเลกุลเหล่านี้ว่า IR-inactive

2. พลังงานของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ให้กับโมเลกุลจะต้องมีค่าพอดีกับผลต่างของระดับพลังงานของการสั่นที่เกี่ยวข้องกับการทรานซิชัน

ตำแหน่งของอะตอมต่างๆ ในโมเลกุลที่มาสสร้างพันธะกันนั้นไม่ได้อยู่นิ่ง จะเกิดการเปลี่ยนไปแบบต่อเนื่องตลอดเวลาทั้งนี้เพราะโมเลกุลเกิดการสั่นอันเนื่องมาจากการยืดและการงอ การสั่นอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความยาวพันธะของโมเลกุล เรียกว่าการสั่นแบบยืด (stretching or valency vibration) ทำให้พันธะยืดออกหรือหดสั้นลง การสั่นแบบยืดมี 2 แบบคือ การยืดแบบมีสมมาตร (symmetric, sym) และการยืดแบบปฏิสมมาตร (asymmetric, asym)

การสั่นอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงมุมพันธะในโมเลกุลเรียกว่า การสั่นแบบงอ (bending) หรือการผิดรูป (deformation) ซึ่งมีด้วยกัน 4 แบบ คือ การงอแบบตะไกรภายในระนาบ (in-plane scissoring) การงอแบบโคลงภายในระนาบ (in-plane rocking) การงอแบบกระดิกออกนอก (out-of-plane wagging) และการงอแบบบิด (out-of-plane twisting)



ภาพที่ 34 แสดงชนิดการสั่นแบบยืดและแบบงอ

ที่มา : ชีรยุทธ วิไลวัลย์ และคณะ, อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี, เข้าถึงเมื่อ 30 พฤศจิกายน 2557, เข้าถึงได้จาก [http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course\\_info/2302275/ir-265.pdf](http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course_info/2302275/ir-265.pdf)

การสั่นแบบยืดและแบบงอของแต่ละพันธะจะมีค่าความถี่เฉพาะ เมื่อโมเลกุลได้รับคลื่นแสงอินฟราเรดที่มีความถี่พอดีกับการสั่นของพันธะในโมเลกุลทำให้เกิดการแทนทรนซ์ชันที่เรียกว่าไวเบรชันนัล แทนทรนซ์ชัน (vibrational transition) และให้แถบดูดกลืนแสงเป็นพีกแคบๆ พลังงานจากคลื่นแสงอินฟราเรดที่ถ่ายเทให้แก่พันธะของโมเลกุลจะไปเพิ่มแอมพลิจูดของการสั่นในโมเลกุลนั้นปรากฏการณ์นี้เรียกว่า เกิดการเรโซแนนซ์ นั่นคือโมเลกุลจะมีพลังงานมากกว่าปกติ (โมเลกุลอยู่ในสภาวะเร้า) และโมเลกุลจะกลับสู่สภาวะพื้น โดยการปล่อยพลังงานในรูปแบบความร้อนออกมา

ตารางที่ 4 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันที่สามัญบางชนิด

พันธะ	ชนิดของสารประกอบ	ช่วง wave number, $\text{cm}^{-1}$
C-H	alkanes	2960-2850(s) stretch
		1470-1350(v) scissoring และ bending
	$\text{CH}_3$ umbrella deformation	1380(m-w)-doublet-isopropyl, t-butyl
C-H	alkanes	3080-3020(m) stretch
		1000-675(s) bend
C-H	aromatic rings	3100-3000(m) stretch
	phenyl ring substitution bonds	870-675(s) bend
	phenyl ring substitution overtones	2000-1600(w) – fingerprint region
C-H	alkynes	3333-3267(s) stretch
		700-610(b) bend
C=C	alkenes	1680-1640(m,w) stretch
$\text{C}\equiv\text{C}$	alkynes	2260-2100(w,sh) stretch
C=C	aromatic rings	1600, 1500(w) stretch
C-O	aldehyde, ethers, carboxylic acids, esters	1260-1000(s) stretch
O-H	monomeric alcohols, phenols	3640-3160(s,br) stretch
	hydrogen bonded alcohols, phenols	3600-3200(b) stretch
	carboxylic acids	3000-2500(b) stretch
N-H	amines	3500-3300(m) stretch
		1650-1580(m) bend
C-N	amines	1340-1020(m) stretch
$\text{C}\equiv\text{N}$	nitriles	2260-2220(v) stretch
$\text{NO}_2$	nitro compounds	1660-1500(s) asymmetrical stretch
		1390-1260(s) asymmetrical stretch

\*\*หมายเหตุ: v – variable, m – medium, s – strong, br – broad, w – weak

ที่มา : บัญชา พูล โภค, **ทฤษฎี IR**, เข้าถึงเมื่อ 29 กันยายน 2557, เข้าถึงได้จาก

[http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course\\_info/2302265/Spectro.pdf](http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course_info/2302265/Spectro.pdf)

#### 4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2006 Causin V, และคณะ ได้ศึกษาความแตกต่างเชิงปริมาณของถุงพลาสติกโดยเทคนิคอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี วัดความหนาและเทคนิค DSC เพื่อติดตามแหล่งที่มาของยาเสพติดที่ผิดกฎหมาย จากการศึกษาตัวอย่างถุงพลาสติกที่ใช้บรรจุ ยาเสพติด จำนวน 50 ตัวอย่าง นำมาวัดความหนา FTIR และ DSC ซึ่งเป็นเทคนิคที่ประยุกต์ พบว่า 97% ของถุงพลาสติกสีขาวที่จับคู่ได้นั้นมีลักษณะเป็นฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีความหนาแตกต่างกันค่อนข้างชัดเจนสามารถนำข้อมูลเหล่านี้มาติดตามแหล่งที่มาของยาเสพติดได้

ในปี ค.ศ. 2006 Causin V, และคณะ ได้ศึกษาการวิเคราะห์ทางนิติวิทยาศาสตร์ของเส้นใยอะคริลิกโดยเทคนิค pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry เป็นเทคนิคที่เหมาะสมในการเปรียบเทียบเส้นใยที่มีลักษณะคล้ายกัน จำเป็นอย่างยิ่งที่การวิเคราะห์จะต้องมีความน่าเชื่อถือเพื่อนำไปสู่การย้อนลำดับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น Hydrocyanic acid, acetonitrile, acrylonitrile, acetic acid, methacrylonitrile, 1,3-dicyanopropene, 1,3-dicyanobutene, 2,4-dicyanobutene และ 1,3,5-tricyanohexane คือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบหลักที่เฉพาะเจาะจงได้ แม้ว่าเส้นใยจะมีลักษณะคล้ายกันมากทั้งในส่วนโครงสร้าง คุณสมบัติ ความเข้มข้น และการเตรียมมอนอเมอร์ที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิสนี้จะช่วยให้สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของเส้นใยได้ ซึ่งมีความสำคัญต่อการตรวจสอบความผิดทางอาญา

ในปี ค.ศ. 2007 Causin V, และคณะ ได้ศึกษาความแตกต่างเชิงปริมาณของถุงพลาสติกโดยเทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (Wide-Angle X-ray Diffraction) จากการศึกษาตัวอย่างถุงที่ใช้บรรจุยาเสพติด จำนวน 33 ตัวอย่าง พบว่าสามารถใช้จำแนกความแตกต่างของถุงพลาสติกได้ เนื่องจากให้ค่าอำนาจในการจำแนก (discriminating power) ได้ถึง 0.992 ซึ่งเป็นค่าที่น่าสนใจอย่างยิ่ง เทคนิคดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานติดตามแหล่งที่มาของยาเสพติดได้

ในปี ค.ศ. 2008 Chipara M, และคณะ ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์วัสดุที่ผสมพอลิโพรไพลีนและเส้นใยนาโนด้วยเทคนิค TGA จากการศึกษาพบว่า วัสดุที่ผสมพอลิโพรไพลีนและเส้นใยนาโนมีโครงสร้างเป็นสองชั้น ชั้นนอกสุดมีลักษณะนุ่ม มีความหนาประมาณ  $10^2$  นาโนเมตรเป็นชั้นที่มีความหนามากที่สุด ส่วนชั้นแกนกลางมีลักษณะแข็งและหนาน้อยกว่า

ในปี ค.ศ. 2008 Sajwan M, และคณะ ได้ศึกษาคุณสมบัติทางนิติวิทยาศาสตร์ของท่อ HDPE ด้วยเทคนิค DSC จากการศึกษาการหลอมเหลวของท่อ HDPE จำนวน 28 ตัวอย่าง จากแหล่งผลิตที่แตกต่างกัน 13 แห่งในประเทศอินเดีย เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC เพื่อดูความแตกต่างของแต่ละแหล่งผลิต พบว่า อุณหภูมิที่หลอมเหลวสามารถนำมาเป็นเกณฑ์ในการจำแนกความแตกต่างของ HDPE ได้

ในปี ค.ศ. 2008 Taylor E, และคณะ ได้ศึกษาเทคนิค Stable isotope ratio mass spectrometry ร่วมกับการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ มาวิเคราะห์ความแตกต่างของถุงซิปลพลาสติก พบว่าเมื่อนำทั้ง 2 เทคนิคนี้มาใช้ร่วมกัน จะสามารถจำแนกได้ว่าถุงซิปลพลาสติกนี้มาจากแหล่งผลิตใดได้

ในปี ค.ศ. 2008 Wu H, และคณะ ได้ศึกษาการวัดสมบัติทางรังสีความร้อนของแผ่นฟิล์มภาพยนตร์ด้วยเทคนิค FTIR จากการศึกษาพบว่าแผ่นฟิล์มจาก aluminium foil (AF) เป็นฟิล์มภาพยนตร์ที่ดีที่สุดในการป้องกันรังสี ในขณะที่แผ่นฟิล์มจาก polyethylene (PE) เป็นฟิล์มภาพยนตร์ที่แย่ที่สุด ส่วนแผ่นฟิล์มจากเส้นใยสังเคราะห์ polyamide ชนิด NB และ NW ที่ทำจากพอลิเมอร์เหมือนกัน แต่มีสีที่ต่างกัน มีความสามารถในการป้องกันรังสีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ในปี ค.ศ. 2009 Causin V, และคณะ ได้ศึกษาการใช้เทคนิค TGA และ DSC เพื่อใช้ในการจำแนกความแตกต่างทางนิติวิทยาศาสตร์ของถุงมือยาง บ่อยครั้งอาชญากรมักจะใช้ถุงมือยางในการก่ออาชญากรรมเพราะต้องการที่จะหลีกเลี่ยงการทิ้งลายนิ้วมือไว้ในที่เกิดเหตุ แต่หากมีถุงมือยางทิ้งไว้ในที่เกิดเหตุหรือบริเวณใกล้เคียงก็สามารถนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการสืบสวน ขั้นตอนการวิเคราะห์ดังกล่าวใช้เทคนิค TGA และ DSC เป็นเทคนิคที่ไม่ซับซ้อน และราคาไม่แพง ไม่ต้องมีการเตรียมตัวอย่าง จากการศึกษาพบว่า 99.5% ของถุงมือยาง ไม่สามารถจำแนกความแตกต่างด้วยตาเปล่าได้ แต่สามารถใช้เทคนิคดังกล่าวในการจำแนกได้เนื่องจากถุงมือยางแต่ละชนิดมีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน การเปรียบเทียบด้วยเทคนิคดังกล่าวจะช่วยยืนยันตัวอาชญากร ที่เกิดเหตุ และสามารถจับกุมผู้ต้องสงสัยได้

ในปี ค.ศ. 2012 Rajandas H, และคณะ ได้ศึกษาการประมาณการย่อยสลายทางชีวภาพของ low-density polyethylene (LDPE) ด้วยเทคนิค ATR-FTIR จากการศึกษาพบว่า เทคนิคดังกล่าว

สามารถใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงปริมาณของการย่อยสลายทางชีวภาพของ low-density polyethylene (LDPE) เมื่อเทียบกับสารมาตรฐาน LDPE จากผลการทดลองพบว่าในเวลา 2 เดือนเชื้อ *Microbacterium paraoxydans* และ *Pseudomonas aeruginosa* สามารถย่อยสลาย LDPE 61.0 % และ 50.50 % ตามลำดับ

ในปี ค.ศ.2014 Farah S, และคณะ ได้ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา สเปกตรัมการวิเคราะห์โครมาโตกราฟี และการเปรียบเทียบเส้นใย PET ทางนิติวิทยาศาสตร์ จากการศึกษาพบว่า ความแตกต่างของน้ำหนักโมเลกุลของสารตัวอย่างเส้นใยสามารถนำมาเปรียบเทียบทางนิติวิทยาศาสตร์ได้ เส้นใย PET จะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยระหว่าง 20,000 ถึง 70,000 g mol<sup>-1</sup> เทคนิคดังกล่าวยังใช้ได้กับเส้นใยพอลิเอไมด์และอะคริลิก



### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย






#### 1. วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

##### 1.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

##### ตารางที่ 5 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย






ที่	ยี่ห้อ	ชิ้นส่วน	ชื่อย่อ	รูปภาพประกอบ
1.	HONDA	พลาสติกครอบแตร	HONDA-HCOVER	
2.	HONDA	พลาสติกบังลมหน้า	HONDA-WH	
3.	HONDA	บังโคลนหน้า	HONDA-RH	
4.	HONDA	โคมไฟหน้า	HONDA-LAMPH	

ตารางที่ 5 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย (ต่อ)



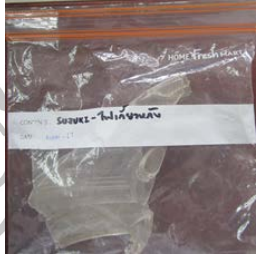


ที่	ยี่ห้อ	ชิ้นส่วน	ชื่อย่อ	รูปภาพประกอบ
5.	HONDA	ไฟเลี้ยวหน้า	HONDA-LH	
6.	HONDA	ไฟเลี้ยวหลัง	HONDA-LT	
7.	HONDA	พลาสติกใต้ เครื่องยนต์	HONDA-UNDER	
8.	HONDA	บังโคลนหลัง	HONDA-RT	
9.	HONDA	พลาสติกครอบตัวถัง	HONDA-BB	



ตารางที่ 5 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย (ต่อ)

ที่	ยี่ห้อ	ชิ้นส่วน	ชื่อย่อ	รูปภาพประกอบ
10.	HONDA	พลาสติกครอบเรือน วัครอบ	HONDA-MCOVER	
11.	HONDA	โคมไฟหลัง	HONDA-LAMPT	
12.	SUZUKI	พลาสติกครอบแตร	SUZUKI-HCOVER	
13.	SUZUKI	พลาสติกบังลมหน้า	SUZUKI-WH	
14.	SUZUKI	บังโคลนหน้า	SUZUKI-RH	






ตารางที่ 5 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย (ต่อ)

ที่	ยี่ห้อ	ชิ้นส่วน	ชื่อย่อ	รูปภาพประกอบ
15.	SUZUKI	โคมไฟหน้า	SUZUKI-LAMPH	
16.	SUZUKI	ไฟเลี้ยวหน้า	SUZUKI-LH	
17.	SUZUKI	ไฟเลี้ยวหลัง	SUZUKI-LT	
18.	SUZUKI	พลาสติกใต้ เครื่องยนต์	SUZUKI-UNDER	
19.	SUZUKI	บังโคลนหลัง	SUZUKI-RT	





ตารางที่ 5 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย (ต่อ)

ที่	ยี่ห้อ	ชิ้นส่วน	ชื่อย่อ	รูปภาพประกอบ
20.	SUZUKI	พลาสติกครอบตัวถัง	SUZUKI-BB	
21.	SUZUKI	พลาสติกครอบเรือน วัครอบ	SUZUKI-MCOVER	
22.	SUZUKI	โคมไฟหลัง	SUZUKI-LAMPT	
23.	YAMAHA	พลาสติกครอบแคช	YAMAHA-HCOVER	
24.	YAMAHA	พลาสติกบังลมหน้า	YAMAHA-WH	

ตารางที่ 5 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย (ต่อ)

ที่	ยี่ห้อ	ชิ้นส่วน	ชื่อย่อ	รูปภาพประกอบ
25.	YAMAHA	บังโคลนหน้า	YAMAHA -RH	
26.	YAMAHA	โคมไฟหน้า	YAMAHA -LAMPH	
27.	YAMAHA	ไฟเลี้ยวหน้า	YAMAHA -LH	
28.	YAMAHA	ไฟเลี้ยวหลัง	YAMAHA -LT	
29.	YAMAHA	พลาสติกใต้ เครื่องยนต์	YAMAHA -UNDER	

ตารางที่ 5 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย (ต่อ)

ที่	ยี่ห้อ	ชิ้นส่วน	ชื่อย่อ	รูปภาพประกอบ
30.	YAMAHA	บังโคลนหลัง	YAMAHA -RT	
31.	YAMAHA	พลาสติกครอบตัวถัง	YAMAHA -BB	
32.	YAMAHA	พลาสติกครอบเรือน หัวครอบ	YAMAHA -MCOVER	
33.	YAMAHA	โคมไฟหลัง	YAMAHA -LAMPT	


## 2. สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

ตารางที่ 6 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย




ลำดับที่	สารเคมี	แหล่งที่มา	รูปภาพ
1.	สารละลายอะซีโตน	Merck	

## 3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย




ตารางที่ 7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ลำดับที่	เครื่องมือและอุปกรณ์/แหล่งที่มา	รูปภาพ
1.	เครื่อง Thermal Gravimetric Analyzer (TGA) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Pyris 1 TGA	

ตารางที่ 7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย (ต่อ)


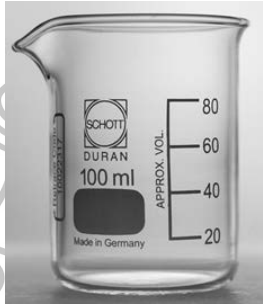

ลำดับที่	เครื่องมือและอุปกรณ์/แหล่งที่มา	รูปภาพ
2.	<p>เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Spectrum 100 FT-IR</p>	
3.	<p>เครื่องชั่ง ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น Dragon 204</p>	
4.	<p>Forceps</p>	

ตารางที่ 7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย (ต่อ)

ลำดับที่	เครื่องมือและอุปกรณ์/แหล่งที่มา	รูปภาพ
5.	กรรไกร	
6.	ตะไบเหล็กสามเหลี่ยม	
7.	ถุงซิปล라스틱	
8.	ถุงพลาสติก PP ขนาดเล็ก	



ตารางที่ 7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย (ต่อ)

ลำดับที่	เครื่องมือและอุปกรณ์/แหล่งที่มา	รูปภาพ
9.	Dropper	
10.	บีกเกอร์แก้ว Duran ขนาด 100 ml	
11.	สำลี ยี่ห้อโรงพยาบาล	

### วิธีการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่างพลาสติก
  - 1.1 นำชิ้นส่วนพลาสติกมาล้างน้ำให้สะอาดแล้วปล่อยให้แห้ง
  - 1.2 ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ให้มีขนาดประมาณ 2-3 mm
  - 1.3 ใส่เศษพลาสติกในถุงซิปลพลาสติกแล้วเขียนกำกับว่าเป็นพลาสติกชนิดใด

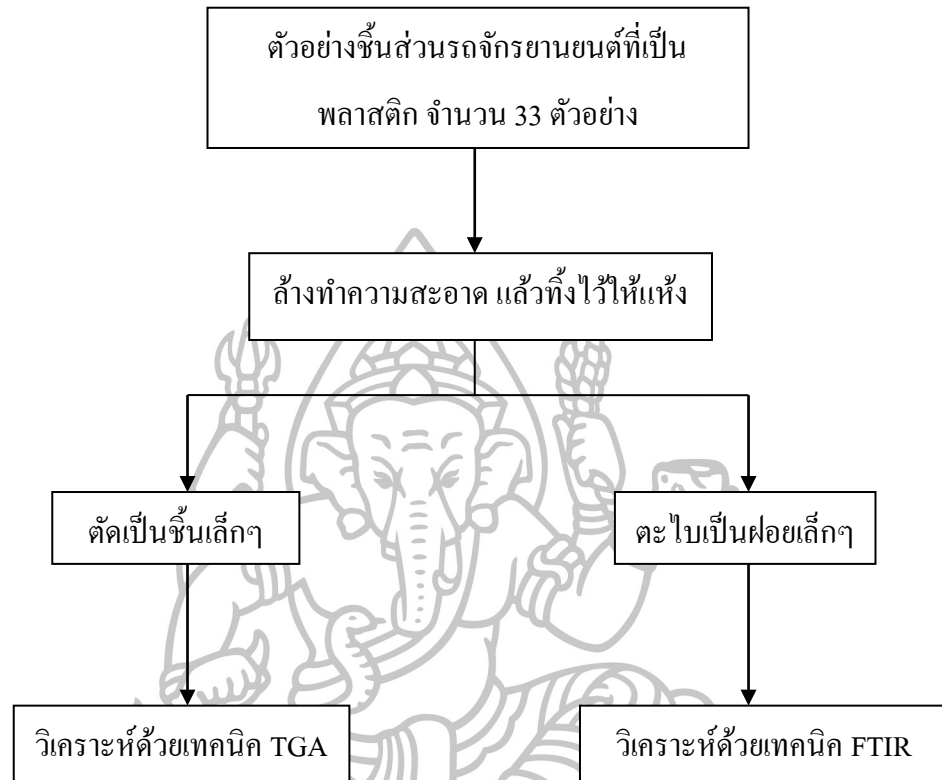
2. การวิเคราะห์เศษชิ้นส่วนพลาสติกด้วยเครื่อง TGA
  - 2.1 ชั่ง crucible เป่าด้วยเครื่อง TGA
  - 2.2 นำ crucible เป่ามาชั่งด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้า แล้วกดเซทให้เป็นศูนย์
  - 2.3 บรรจุเศษพลาสติกลงใน crucible แล้วนำไปชั่งให้ได้น้ำหนักประมาณ 5 mg
  - 2.4 นำ crucible มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA โดยตั้งเครื่อง TGA ดังนี้

ตารางที่ 8 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

- 2.5 นำ crucible ออกมา แล้วรอให้อุณหภูมิลดลง
  - 2.6 ทำตามข้อ 2.1-2.5 จนครบตามตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์
  - 2.7 นำผล chromatogram ที่ได้มาวิเคราะห์
3. การวิเคราะห์เศษชิ้นส่วนพลาสติกด้วยเครื่อง FTIR
    - 3.1 ทำการเสียบปลั๊ก เปิดเครื่องสำรองไฟ เปิดเครื่องปริ้นเตอร์ และเปิดเครื่อง IR
    - 3.2 ปล่อยให้ทิ้งไว้ 15 นาทีก่อนทำการวัดตัวอย่าง เพื่อทำการ calibrate
    - 3.3 วางตัวอย่างลงบนแท่นวางของเครื่อง FTIR
    - 3.4 เปิดโปรแกรมสำหรับวัด IR ทำการ scan background
    - 3.5 ทำการตั้งค่าโปรแกรมเครื่อง โดยตั้งค่า การ scan ตั้งแต่ 4000 – 650  $\text{cm}^{-1}$  ที่ 32 scan พร้อมกับระบุชื่อตัวอย่างแต่ละชนิด
    - 3.6 เครื่องมือจะทำการวัดและบันทึกผล
    - 3.7 ทำตามข้อ 3.1-3.5 จนครบตามตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์
    - 3.8 นำผล spectrum ที่ได้มาวิเคราะห์

## แผนผังการทดลอง



ภาพที่ 35 แผนผังการทดลองในงานวิจัย

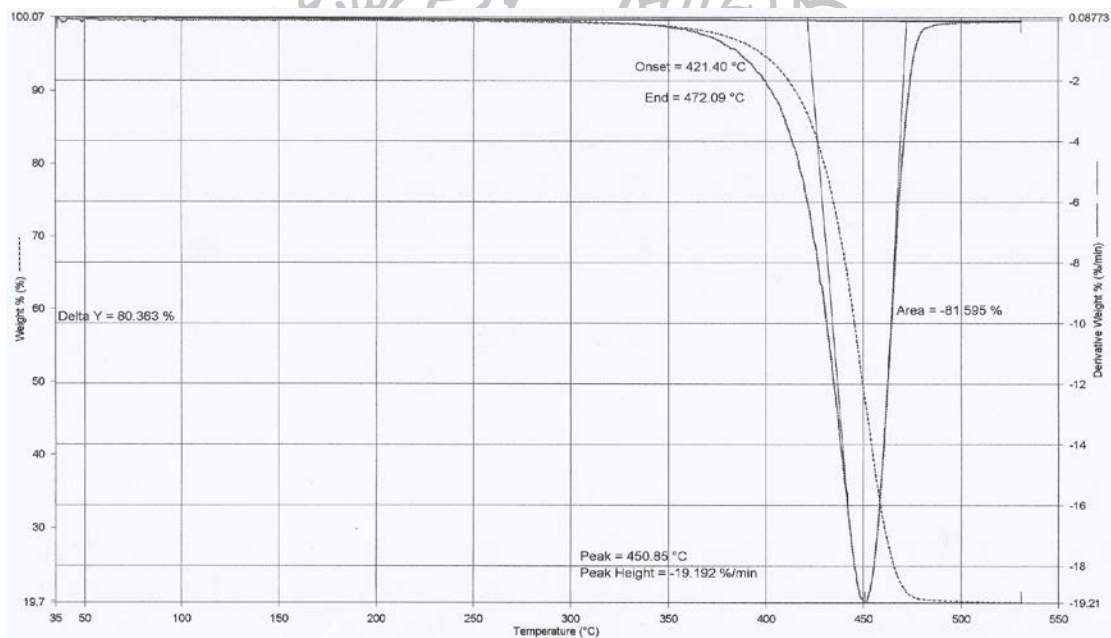


## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

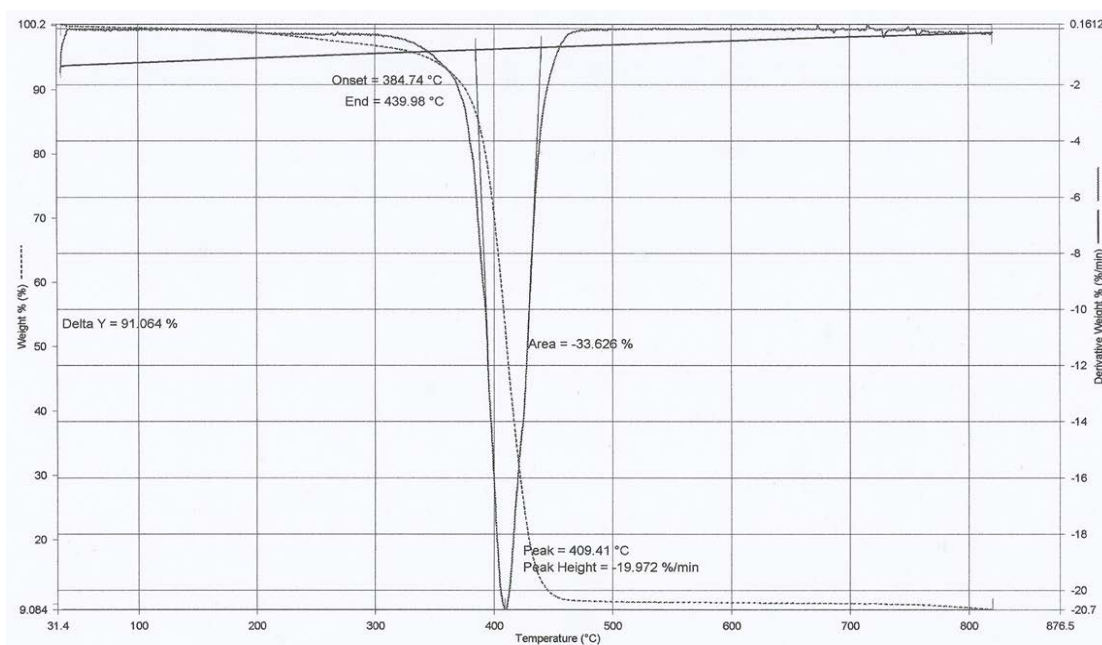
#### 1. การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค TGA

จากการนำตัวอย่างชิ้นส่วนพลาสติกของรถจักรยานยนต์ จำนวน 33 ตัวอย่าง มาทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ได้ผลการทดลองเป็นการสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน แสดงในรูปแบบเทอร์โมแกรมแบบ TGA curve และ DTG (Derivative thermogram analysis) โดย TGA จะแสดงการเปลี่ยนแปลงมวลพล็อตระหว่างน้ำหนัก (mg) และอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) ส่วน DTG เป็นการพล็อตอัตราการสูญเสียมวลเทียบกับเวลา ( $dm/dt$ ) และอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) การสลายตัวของตัวอย่างได้แสดงในรูปแบบเทอร์โมแกรมตามภาพที่ 36



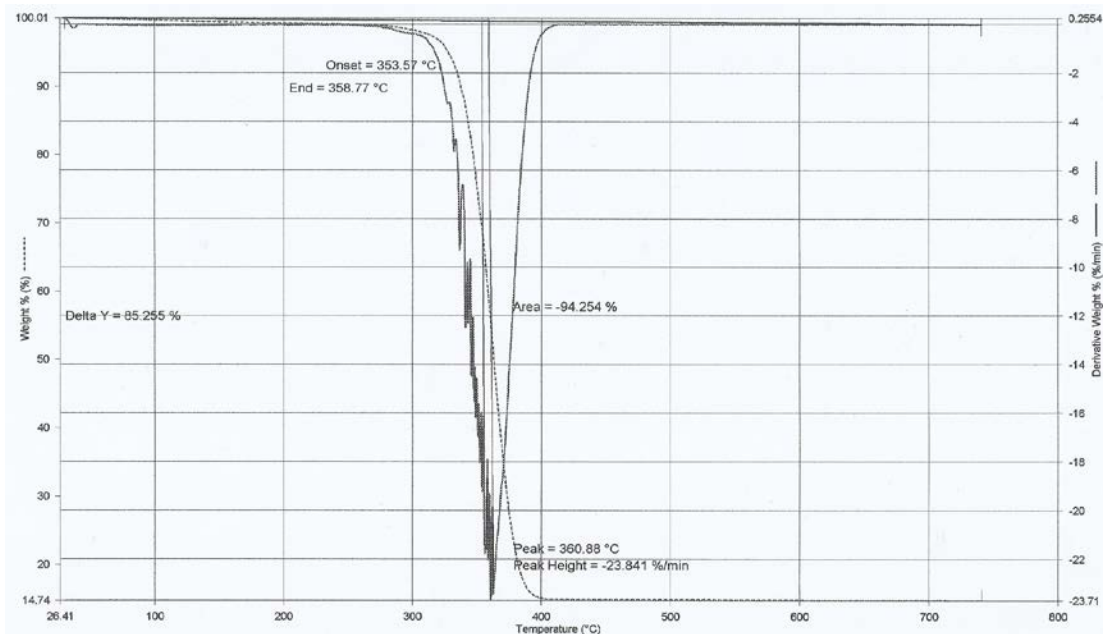
ภาพที่ 36 เทอร์โมแกรมของตัวอย่างพลาสติกบังโคลนหลัง Honda-RT ด้วยเทคนิค TGA

จากภาพที่ 36 แสดงเทอร์โมแกรมของตัวอย่าง Honda-RT พบว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมแกรมมีเพียงขั้นตอนเดียว ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น-สุดท้ายของการเปลี่ยนแปลงมวล (Onset-End Temperature) อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 421.40-472.09 °C โดยที่อุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสูงสุดมีค่า 450.85 °C และมีเปอร์เซ็นต์ที่น้ำหนักตัวอย่างหายไปถึง 80.36 %



ภาพที่ 37 เทอร์โมแกรมของตัวอย่างพลาสติกกรอบตัวถัง Honda-BB ด้วยเทคนิค TGA

จากภาพที่ 37 แสดงเทอร์โมแกรมของตัวอย่าง Honda-BB พบว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมแกรมมีเพียงขั้นตอนเดียว ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น-สุดท้ายของการเปลี่ยนแปลงมวล (Onset-End Temperature) อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 384.74-439.96 °C โดยที่อุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสูงสุดมีค่า 409.41 °C และมีเปอร์เซ็นต์ที่น้ำหนักตัวอย่างหายไปถึง 80.36 %



ภาพที่ 38 เทอร์โมแกรมของตัวอย่างพลาสติกไฟเลียหลัง Honda-LT ด้วยเทคนิค TGA

จากภาพที่ 38 แสดงเทอร์โมแกรมของตัวอย่าง Honda-LT พบว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมแกรมมีเพียงขั้นตอนเดียว ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น-สุดท้ายของการเปลี่ยนแปลงมวล (Onset-End Temperature) อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 353.57-358.77 °C โดยที่อุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสูงสุดมีค่า 360.88 °C และมีเปอร์เซ็นต์ที่น้ำหนักตัวอย่างหายไปถึง 85.26 %

จากการวิเคราะห์พลาสติก 33 ตัวอย่างด้วยเทคนิค TGA พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมแกรมมีเพียงขั้นตอนเดียว ซึ่งสามารถจัดจำแนกการเปลี่ยนแปลงได้ 3 กลุ่ม ตามค่าอุณหภูมิเริ่มต้น-สุดท้ายของการเปลี่ยนแปลงมวล (Onset-End Temperature) ดังนี้ โดยกลุ่มที่หนึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 419-472 °C กลุ่มที่สองอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 382-455 °C และกลุ่มสุดท้ายอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 316-392 °C ตามลำดับ แสดงตามตารางที่ 9 ดังนี้

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์เศษชิ้นส่วนพลาสติกจากรถจักรยานยนต์ด้วยเทคนิค TGA

กลุ่ม	ตัวอย่าง	การลดของน้ำหนัก		
		Onset Temp. (°C)	อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง มากที่สุด (°C)	Delta Y (%)
1	HONDA-RT	421.40-472.09	450.85	80.36
	HONDA-Under	419.43-469.53	451.93	92.79
	SUZUKI-RT	427.63-463.26	443.49	98.80
	YAMAHA-RT	426.96-462.28	443.95	136.11
	YAMAHA-Under	430.33-460.90	444.36	99.12
	SUZUKI-Under	412.40-468.15	448.27	59.26
2	HONDA-BB	384.74-439.98	409.41	91.06
	HONDA-WH	392.57-455.25	421.81	82.48
	HONDA-RH	381.01-430.38	404.87	92.09
	SUZUKI-RH	388.63-444.35	408.68	71.41
	SUZUKI-WH	383.89-441.51	409.11	92.63
	SUZUKI-Hcover	383.67-431.78	407.95	93.93
	HONDA- Hcover	385.97-433.91	410.35	83.56
	YAMAHA-Hcover	385.47-439.39	407.09	201.62
	YAMAHA-BB	382.67-443.30	406.60	99.32
	YAMAHA-WH	390.28-443.08	410.49	93.89
	SUZUKI-BB	386.23-434.79	406.67	99.68
	HONDA-LampT	385.61-431.18	412.70	59.18
YAMAHA-RH	383.66-443.58	407.84	95.48	

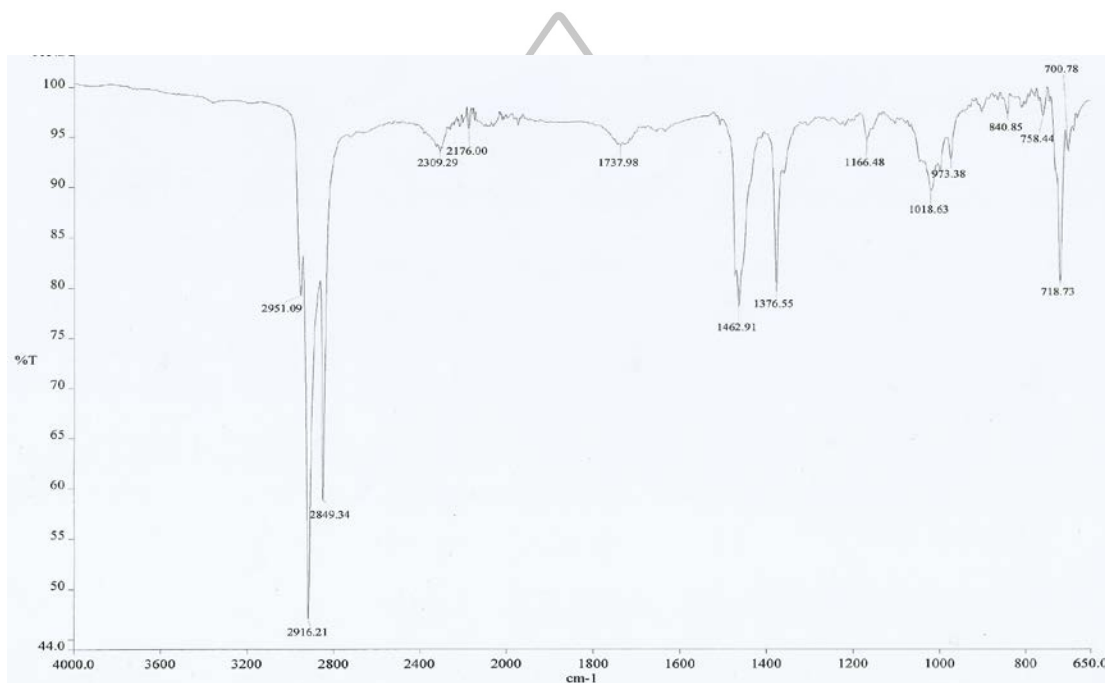
ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์เศษชิ้นส่วนพลาสติกจากรถจักรยานยนต์ด้วยเทคนิค TGA (ต่อ)

กลุ่ม	ตัวอย่าง	การลดของน้ำหนัก		
		Onset Temp. ( $^{\circ}$ C)	อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง มากที่สุด ( $^{\circ}$ C)	Delta Y (%)
3	HONDA-LT	353.57-358.77	360.88	85.26
	YAMAHA-LH	338.99-389.85	362.24	105.89
	YAMAHA-LampT	328.94-388.20	361.43	179.71
	YAMAHA-Mcover	340.86-390.80	362.96	139.84
	SUZUKI-Mcover	341.19-387.21	359.88	82.16
	HONDA-Mcover	316.49-380.56	351.61	69.61
	YAMAHA-LampH	321.74-381.12	351.41	168.82
	YAMAHA-LT	335.27-392.30	366.36	77.65
	SUZUKI-LT	338.01-388.93	361.95	82.65
	SUZUKI-LH	334.04-390.37	362.84	134.13
	SUZUKI-LampH	341.78-391.34	364.88	64.34
	SUZUKI-LampT	341.98-390.69	362.10	60.67
	HONDA-LH	325.95-386.91	361.50	100.45
	HONDA-LampH	342.14-388.80	361.32	78.49



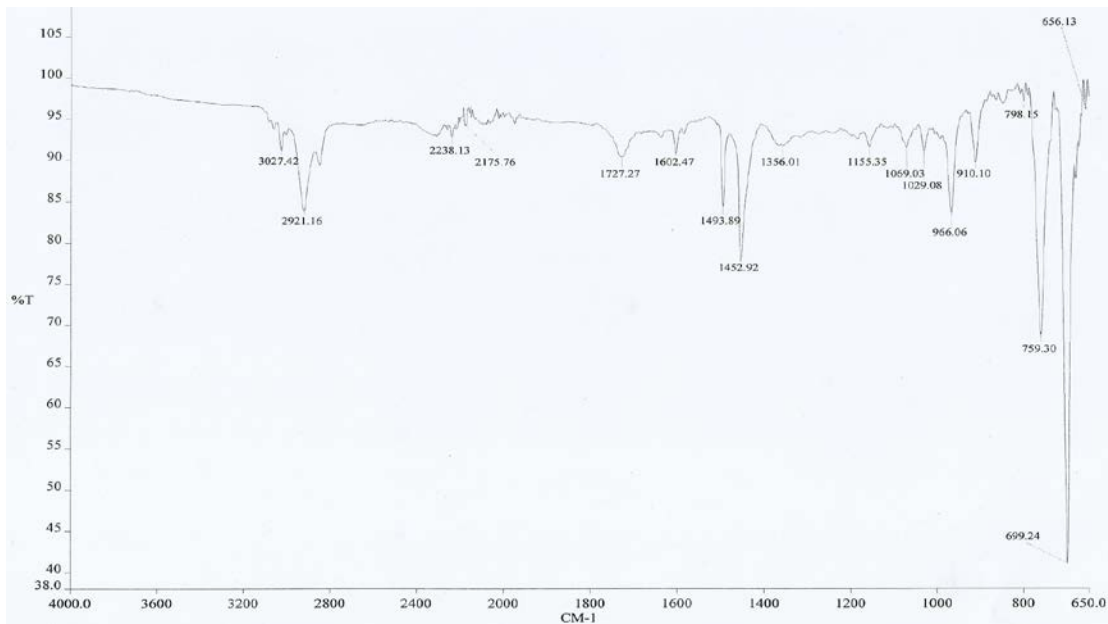
## 2. การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค FTIR

จากการนำตัวอย่างชิ้นส่วนพลาสติกของรถจักรยานยนต์ จำนวน 33 ตัวอย่าง มาทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่าย ประหยัดเวลา ประหยัดค่าใช้จ่าย และสามารถนำตัวอย่างกลับมาใช้ใหม่ได้โดยไม่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี ผลการทดลองแสดงในรูปแบบสเปกตรัม โดยแสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่าง %T และเลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ ) ตามภาพที่ 39



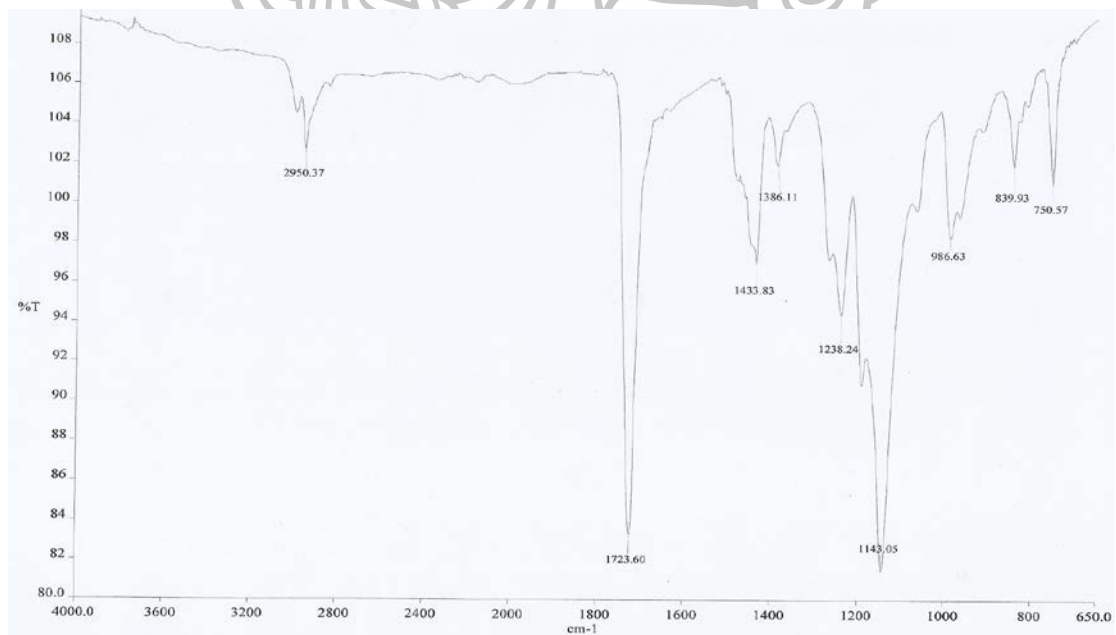
ภาพที่ 39 สเปกตรัมของตัวอย่างพลาสติกบังโคลนหลัง Honda-RT ด้วยเทคนิค FTIR

จากการพิจารณาภาพที่ 39 สเปกตรัมของตัวอย่างพลาสติกบังโคลนหลัง Honda-RT ด้วยเทคนิค FTIR พบว่า ปรากฏ peak ที่สำคัญ ดังนี้  $2916 \text{ cm}^{-1}$  ( $\text{CH}_3$ ),  $2849 \text{ cm}^{-1}$  ( $\text{CH}_3$ ),  $1462 \text{ cm}^{-1}$  ( $\text{CH}_3$ ),  $1376 \text{ cm}^{-1}$  ( $\text{CH}_3$ ) และ  $718 \text{ cm}^{-1}$  ( $-\text{CH}_2-\text{CH}$ )



ภาพที่ 40 สเปกตรัมของตัวอย่างพลาสติกครอบตัวถัง Honda-BB ด้วยเทคนิค FTIR

จากการพิจารณาภาพที่ 40 สเปกตรัมของตัวอย่างพลาสติกบังโคลนหลัง Honda-BB ด้วยเทคนิค FTIR พบว่า ปรากฏ peak ที่สำคัญ ดังนี้ 2238 cm<sup>-1</sup> (nitrile moieties), 1602 cm<sup>-1</sup> (styrene moieties) และ 966 cm<sup>-1</sup> (trans-2-butene-1,4-diyl moieties)



ภาพที่ 41 สเปกตรัมของตัวอย่างพลาสติกไฟเลียหลัง Honda-LT ด้วยเทคนิค FTIR

จากการพิจารณาภาพที่ 41 สเปกตรัมของตัวอย่างพลาสติกบั้งโคลนหลัง Honda-LT ด้วยเทคนิค FTIR พบว่า ปรากฏ peak ที่สำคัญ ดังนี้  $2950\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{CH}_3$ ),  $1723\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{C}=\text{O}$ ),  $1434\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{C}=\text{C}$ ),  $1386\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{C}-\text{CH}_3$ ),  $1237\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{C}-\text{O}$ ),  $1142\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{C}-\text{O}$ ) และ  $840\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{C}(\text{CH}_3)_2$ )

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์เศษชิ้นส่วนพลาสติกจากรถจักรยานยนต์ด้วยเทคนิค FTIR

กลุ่ม	ตัวอย่าง	Wave number ( $\text{cm}^{-1}$ )	Functional group
1	HONDA-RT	2916	$-\text{CH}_3$
	HONDA-Under	2849	$-\text{CH}_3$
	SUZUKI-RT		$-\text{CH}_3$
	YAMAHA-RT	1462	$-\text{CH}_3$
	YAMAHA-Under	1376	$-\text{CH}_3$
	SUZUKI-Under		$-\text{CH}_3$
		718	$-\text{CH}_2-\text{CH}$
2	HONDA-BB	2238	nitrile moities
	HONDA-WH		
	HONDA-RH		
	SUZUKI-RH		
	SUZUKI-WH	1602	styrene moities
	SUZUKI-Hcover		
	HONDA- Hcover	966	tran-2-butene-1,4-diyl moities
	YAMAHA-Hcover		
	YAMAHA-BB		
	YAMAHA-WH		
	SUZUKI-BB		
	HONDA-LampT		
YAMAHA-RH			

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมอินฟราเรดของพลาสติกจากรถจักรยานยนต์ด้วยเทคนิค FTIR (ต่อ)

กลุ่ม	ตัวอย่าง	Wave number ( $\text{cm}^{-1}$ )	Functional group
3	HONDA-LT	2950	$-\text{CH}_3$
	YAMAHA-LH	1723	$\text{C}=\text{O}$
	YAMAHA-LampT	1434	$\text{C}=\text{C}$
	YAMAHA-Mcover	1386	$-\text{C}-\text{CH}_3$
	SUZUKI-Mcover	1237	$\text{C}-\text{O}$
	HONDA-Mcover	1142	$\text{C}-\text{O}$
	YAMAHA-LampH		
	YAMAHA-LT	840	$-\text{C}(\text{CH}_3)_2$
	SUZUKI-LT		
	SUZUKI-LH		
	SUZUKI-LampH		
	SUZUKI-LampT		
	HONDA-LH		
	HONDA-LampH		

## บทที่ 5

### บทสรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 1. สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

ในการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนและการดูดกลืนแสงของชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ที่เป็นพลาสติกด้วยเทคนิค TGA และ FTIR จำนวน 33 ตัวอย่าง สามารถสรุปและอภิปรายผลการทดลองได้ดังนี้

จากผลการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของตัวอย่างพลาสติกด้วยเทคนิค TGA พบว่าเทอร์โมแกรมที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงมวลเพียงครั้งเดียว สามารถจัดจำแนกการเปลี่ยนแปลงได้ 3 กลุ่ม ตามค่าอุณหภูมิเริ่มต้น-สุดท้ายของการเปลี่ยนแปลงมวล (Onset-End Temperature) ดังนี้ โดยกลุ่มที่หนึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 419-472 °C มีเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปอยู่ในช่วง 59-136 % ประกอบด้วย 6 ตัวอย่าง คือ HONDA-RT, HONDA-Under, SUZUKI-RT, YAMAHA-RT, YAMAHA-Under และ SUZUKI-Under กลุ่มที่สองอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 382-455 °C มีเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปอยู่ในช่วง 59-202 % ประกอบด้วย 13 ตัวอย่าง คือ HONDA-BB, HONDA-WH, HONDA-RH, SUZUKI-RH, SUZUKI-WH, SUZUKI-Hcover, HONDA-Hcover, YAMAHA-Hcover, YAMAHA-BB, YAMAHA-WH, SUZUKI-BB, HONDA-LampT และ YAMAHA-RH และและกลุ่มสุดท้ายอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 316-392 °C มีเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปอยู่ในช่วง 60-180 % ประกอบด้วย 14 ตัวอย่าง คือ HONDA-LT, YAMAHA-LH, YAMAHA-LampT, YAMAHA-Mcover, SUZUKI-Mcover, HONDA-Mcover, YAMAHA-LampH, YAMAHA-LT, SUZUKI-LT, SUZUKI-LH, SUZUKI-LampH, SUZUKI-LampT, HONDA-LH และ HONDA-LampH

จากผลการศึกษาการดูดกลืนแสงของตัวอย่างพลาสติก ด้วยเทคนิค FTIR พบว่า สเปกตรัมที่ได้สามารถจำแนกชนิดพลาสติกได้ทั้งหมด 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่หนึ่ง ประกอบด้วย 6 ตัวอย่าง คือ

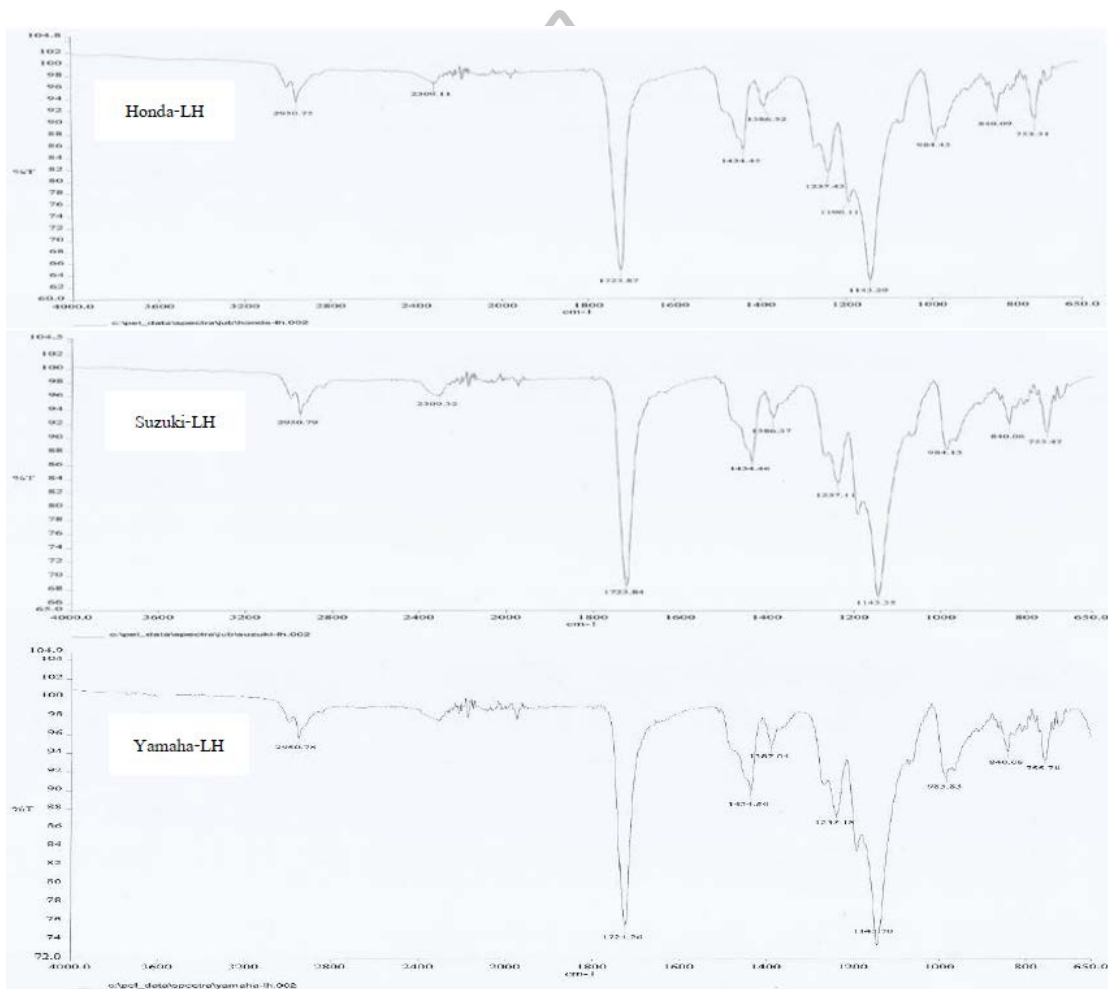
HONDA-RT, HONDA-Under, SUZUKI-RT, YAMAHA-RT, YAMAHA-Under และ SUZUKI-Under กลุ่มที่สอง ประกอบด้วย 13 ตัวอย่าง คือ HONDA-BB, HONDA-WH, HONDA-RH, SUZUKI-RH, SUZUKI-WH, SUZUKI-Hcover, HONDA-Hcover, YAMAHA-Hcover, YAMAHA-BB, YAMAHA-WH, SUZUKI-BB, HONDA-LampT และ YAMAHA-RH และกลุ่มที่สาม ประกอบด้วย 14 ตัวอย่าง คือ HONDA-LT, YAMAHA-LH, YAMAHA-LampT, YAMAHA-Mcover, SUZUKI-Mcover, HONDA-Mcover, YAMAHA-LampH, YAMAHA-LT, SUZUKI-LT, SUZUKI-LH, SUZUKI-LampH, SUZUKI-LampT, HONDA-LH และ HONDA-LampH

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA และ FTIR สามารถจัดกลุ่มได้ 3 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มที่หนึ่ง เป็นพลาสติกที่อาจจะทำมาจาก Polypropylene (PP) ได้แก่ พลาสติกบังโคลนหลัง และพลาสติกใต้เครื่อง เนื่องจากมีลักษณะของสเปกตรัมสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ju, H. และคณะ (2012) ที่ได้้นำเทคนิค FTIR มาศึกษา MMA-PP ในแบตเตอรี่ลิเทียม ซึ่งพบว่ามี peak ปรากฏคล้ายกันดังนี้  $2916\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{CH}_2$ ),  $2849\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{CH}_3$ ),  $1462\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{CH}_2$ ),  $1376\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{CH}_3$ ) และ  $718\text{ cm}^{-1}$  ( $-\text{CH}_2-\text{CH}$ ) ส่วนกลุ่มที่สอง เป็นพลาสติกที่อาจจะทำมาจาก Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) ได้แก่ พลาสติกครอบตัวถัง บังลมหน้า บังโคลนหน้า และครอบแตร เนื่องจากมีลักษณะของเทอร์โมแกรมและสเปกตรัมสอดคล้องกับงานวิจัยของ Peydro, M.A. และคณะ (2013) ที่ได้้นำเทคนิค TGA และ FTIR มาศึกษาสมบัติทางความร้อนของ ABS ซึ่งพบว่ามี peak ปรากฏคล้ายกันดังนี้  $2238\text{ cm}^{-1}$  (nitrile moieties),  $1602\text{ cm}^{-1}$  (styrene moieties) และ  $966\text{ cm}^{-1}$  (tran-2-butene-1,4-diyl moieties) ส่วนกลุ่มที่สาม เป็นพลาสติกที่อาจจะทำมาจาก Polycarbonate (PC) ได้แก่ พลาสติกครอบเรือนวัครอบ ไฟเลี้ยว และโคมไฟ เนื่องจากมีลักษณะของสเปกตรัมสอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang, X. และคณะ (2006) ที่ได้้นำเทคนิค FTIR มาศึกษาเกลือของ PC ในเปลวไฟของ potassium perfluorobutane sulfonate พบว่ามี peak ปรากฏคล้ายกัน ดังนี้  $2950\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{CH}_3$ ),  $1723\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{C}=\text{O}$ ),  $1434\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{C}=\text{C}$ ),  $1386\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{C}-\text{CH}_3$ ),  $1237\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{C}-\text{O}$ ),  $1142\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{C}-\text{O}$ ) และ  $840\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{C}(\text{CH}_3)_2$ )

จากการศึกษาพบว่าชิ้นส่วนที่พบบ่อยสถานที่เกิดเหตุเมื่อมีการเฉี่ยวชน คือ ไฟหน้า บังโคลน และไฟท้าย เพื่อประโยชน์ในงานด้านนิติวิทยาศาสตร์จึงทำการเปรียบเทียบตัวอย่างที่

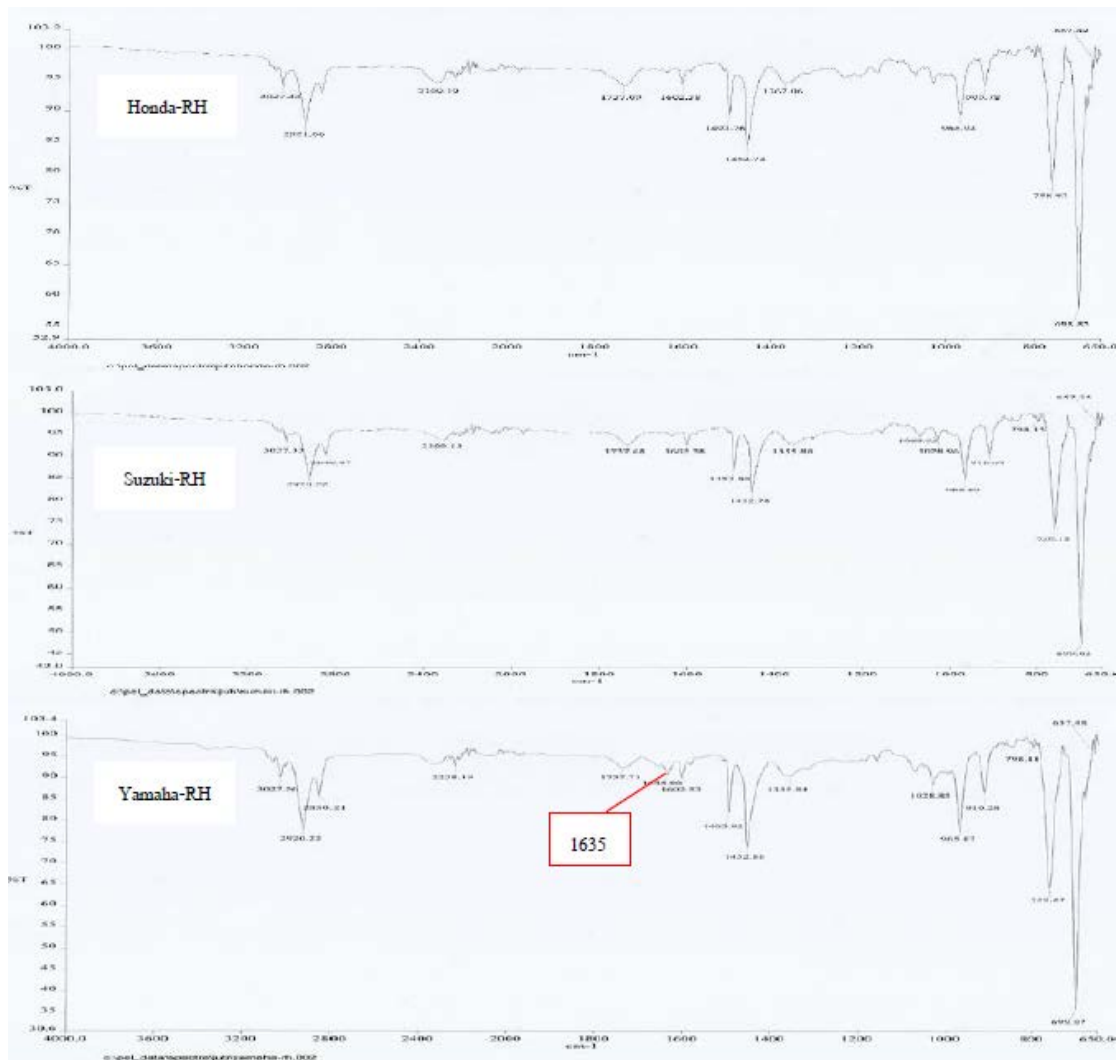
อาจจะเป็นประโยชน์ต่องานสืบสวนและสอบสวน โดยทำการเปรียบเทียบสเปกตรัมจากเทคนิค FTIR โดยใช้ตัวอย่าง 6 กลุ่ม คือ พลาสติกไฟเลียหน้า บังโคลนหน้า โคมไฟหน้า ไฟเลียหลัง โคมไฟหลัง และบังโคลนหลัง

จากการพิจารณาพลาสติกไฟเลียหน้า (LH) พบว่า ตัวอย่างทั้งสามยี่ห้อไม่มี peak ที่มีความแตกต่างกัน ตามภาพที่ 42



ภาพที่ 42 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ของตัวอย่างไฟเลียหน้า Honda-LH Suzuki-LH และ Yamaha-LH ตามลำดับ

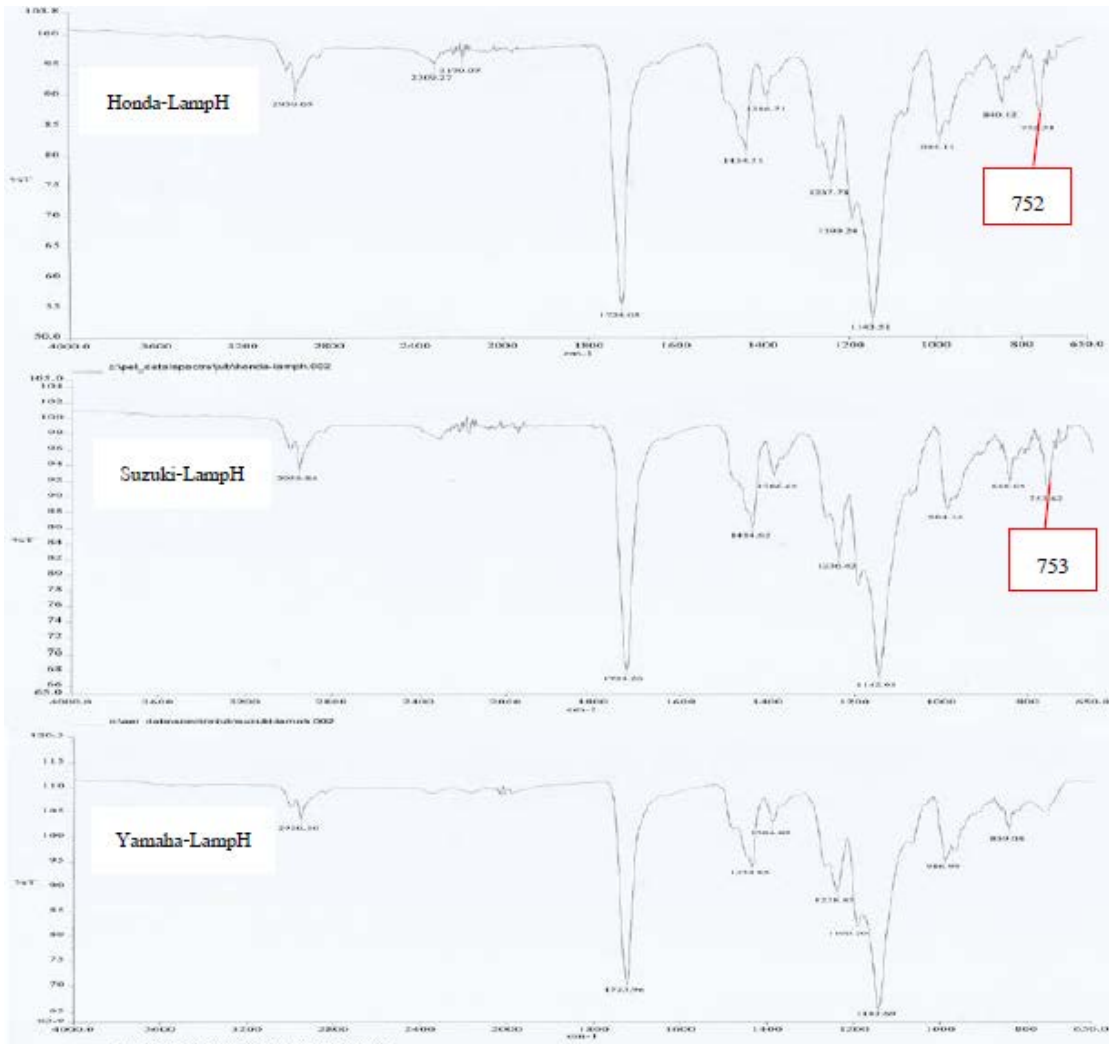
ส่วนพลาสติกบังโคลนหน้า (RH) พบว่า ตัวอย่าง Yamaha-RH ปรากฏ peak ที่แตกต่างจากตัวอย่างยี่ห้ออื่นตรงตำแหน่งเลขคลื่น  $1635\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งอาจจะเป็นสารเติมแต่งบางชนิด ตามภาพที่ 43



ภาพที่ 43 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ของตัวอย่างบังโคลนหน้า Honda-RH Suzuki-RH และ Yamaha-RH ตามลำดับ

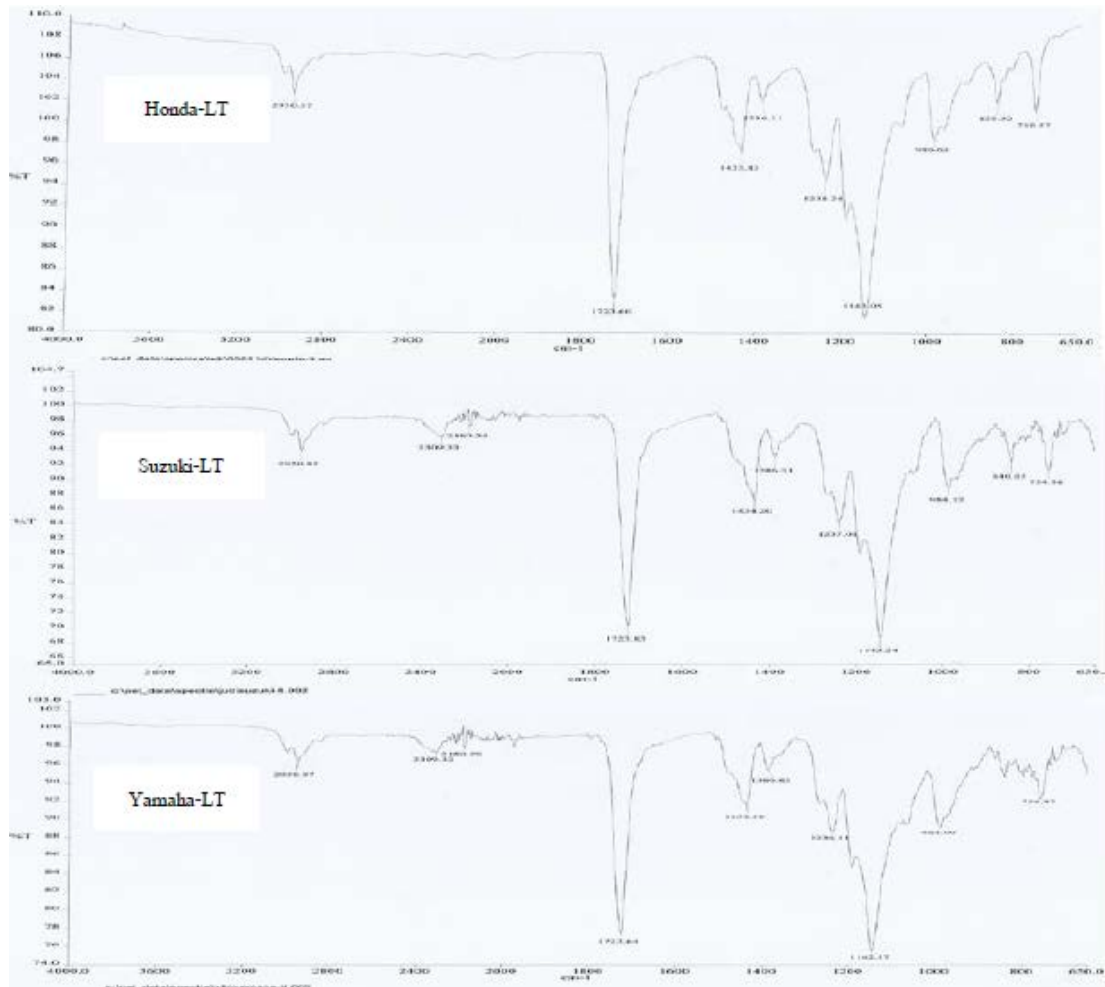
ส่วนพลาสติกโคมไฟหน้า (LampH) พบว่า ตัวอย่าง Honda-LampH และ Suzuki-LampH ปรากฏ peak ที่แตกต่างจากตัวอย่างยี่ห้อ Yamaha ตรงตำแหน่งเลขคลื่น  $752$  และ  $753 \text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งอาจจะเป็นสารเติมแต่งบางชนิด ตามภาพที่ 44





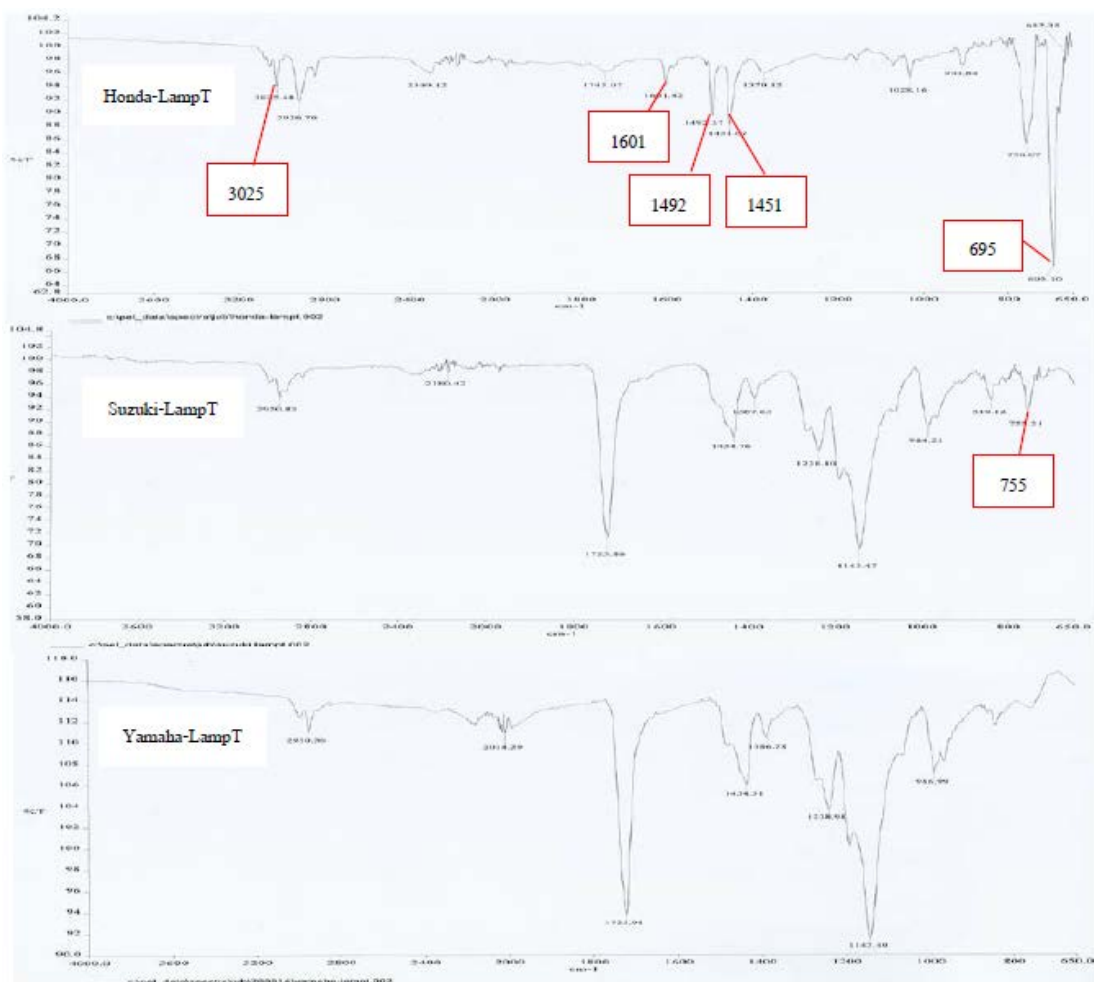
ภาพที่ 44 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ของตัวอย่างโคมไฟหน้า Honda-LampH Suzuki-LampH และ Yamaha-LampH ตามลำดับ

ส่วนพลาสติกไฟเลียวหลัง (LT) พบว่า ตัวอย่างทั้งสามยี่ห้อ ไม่มี peak ที่มีความแตกต่างกัน ตามภาพที่ 45



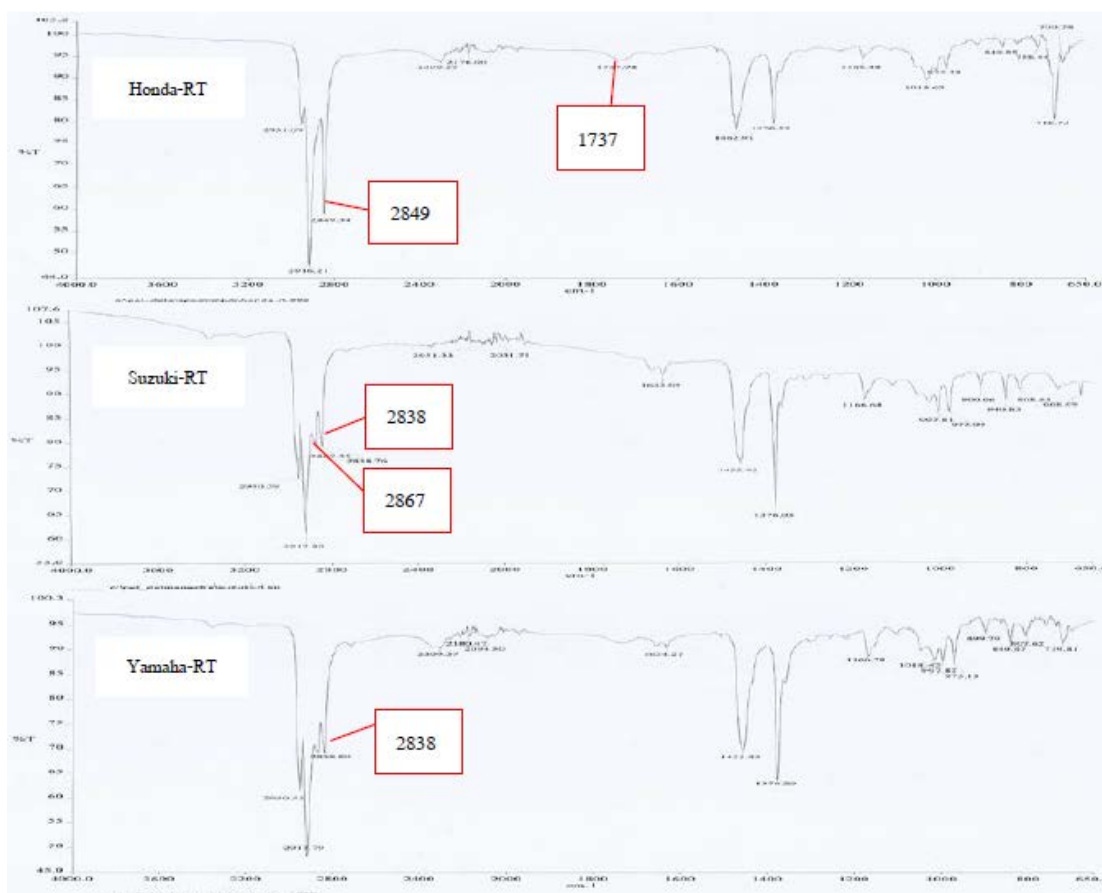
ภาพที่ 45 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ของตัวอย่างโคมไฟหน้า Honda-LT Suzuki-LT และ Yamaha-LT ตามลำดับ

ส่วนพลาสติกโคมไฟหลัง (LampT) พบว่า ตัวอย่าง Honda-LampT ปรากฏ peak ที่แตกต่างจากยี่ห้ออื่นดังนี้  $3025$   $1601$   $1492$   $1451$  และ  $695\text{ cm}^{-1}$  ส่วนตัวอย่าง Suzuki-LampT ปรากฏ peak ที่แตกต่างจาก Yamaha-LampT ตรงตำแหน่งเลขคลื่น  $755\text{ cm}^{-1}$  ตามภาพที่ 46



ภาพที่ 46 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ของตัวอย่างโคมไฟหน้า Honda-LampT Suzuki-LampT และ Yamaha-LampT ตามลำดับ

ส่วนพลาสติกบังโคลนหลัง (RT) พบว่า ตัวอย่าง Honda-RT ปรากฏ peak ที่แตกต่างจากยี่ห้ออื่นดังนี้ 2849 และ 1737  $\text{cm}^{-1}$  ส่วน Suzuki-RT ปรากฏ peak ที่แตกต่างจากยี่ห้ออื่นดังนี้ 2838 และ 2867  $\text{cm}^{-1}$  ตามภาพที่ 47



ภาพที่ 47 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมจากเทคนิค FTIR ของตัวอย่างโคมไฟหน้า Honda-RT Suzuki-RT และ Yamaha-RT ตามลำดับ

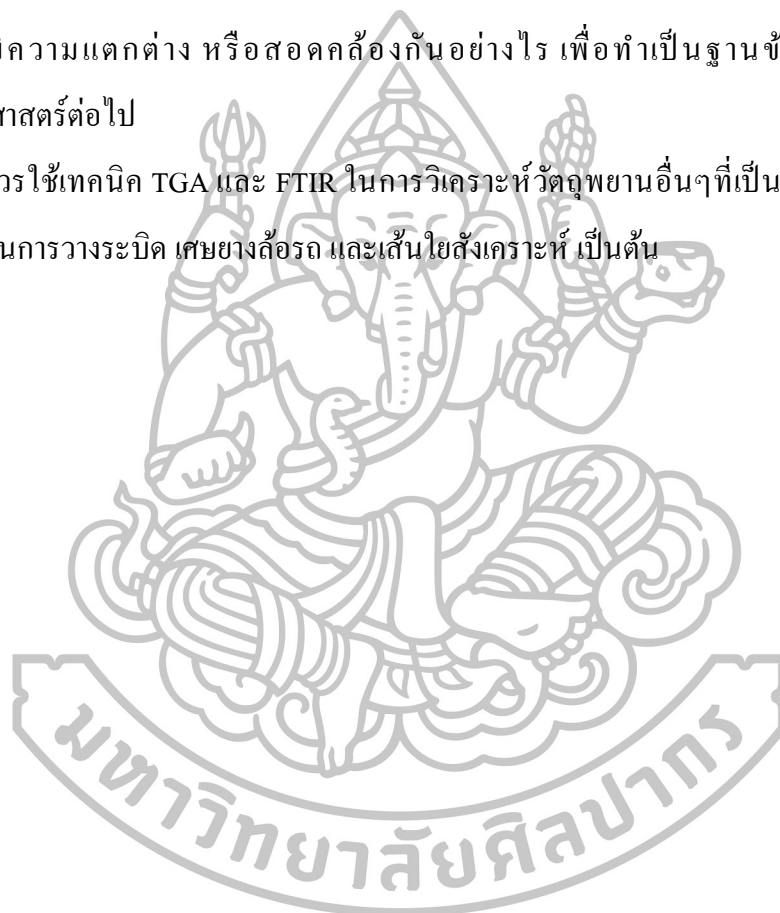
จากการเปรียบเทียบสเปกตรัมของตัวอย่างข้างต้น พบว่า พลาสติกกลุ่มบ่งโคลนหน้าไฟเลี้ยวหลัง โคมไฟหลัง และบ่งโคลนหลัง แต่ละยี่ห้อปรากฏ peak ที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าพลาสติกเหล่านี้ใช้สารเติมแต่งที่ต่างชนิดกัน ลักษณะเฉพาะเหล่านี้จะเป็นเอกลักษณ์ที่สำคัญของพลาสติก ทำให้สามารถระบุแหล่งที่มา เปรียบเทียบ และบ่งชี้ข้อเท็จจริงที่เกิดขึ้นในสถานที่เกิดเหตุเพื่อนำไปสู่การดำเนินคดีตามกฎหมายต่อไป ซึ่งถือว่าเป็นประโยชน์กับงานด้านนิติวิทยาศาสตร์เป็นอย่างมาก

## 2. ข้อเสนอแนะ

1. ในการจำแนกเศษพลาสติกควรใช้เทคนิคอื่นเพิ่มเติม เช่น SEM, DSC หรือการศึกษาความหนาแน่นของพลาสติก เป็นต้น จะช่วยให้การจำแนกเศษพลาสติกมีความละเอียดแม่นยำมากยิ่งขึ้น

2. ควรเพิ่มตัวอย่างให้มากกว่านี้ เพื่อที่จะได้ทราบว่าชิ้นส่วนพลาสติกของจักรยานยนต์แต่ละยี่ห้อมีความแตกต่าง หรือสอดคล้องกันอย่างไร เพื่อทำเป็นฐานข้อมูลไว้ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์ต่อไป

3. ควรใช้เทคนิค TGA และ FTIR ในการวิเคราะห์วัตถุพยานอื่นๆที่เป็นพอลิเมอร์ เช่น เทปกาวที่ใช้ในการวางระเบิด เศษยางล้อรถ และเส้นใยสังเคราะห์ เป็นต้น



## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

เกรียงศักดิ์ วงศ์พร้อมรัตน์. (2556). **รอบรู้เรื่องพลาสติก**. กรุงเทพฯ : อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิ สถาบันพลาสติก.

เจริญ นาคะสรรค์. (2546). **เทคโนโลยีเบื้องต้นทางพลาสติก**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ โฟร์เพช.

ญาดา ประพงค์เสนา อิศราณีย์ แสงเพชร พรภนา นิ่มนวล และสุกัญญา ช่วยหมุด. (2546).  
**กรณีศึกษา: รายงานศึกษาอุบัติเหตุรถจักรยานยนต์**. สำนักอำนวยการความปลอดภัย  
 กรมทางหลวง: 2-4

ณัฐินี โล่ห์พัฒนานนท์. (2552). **พอลิเมอร์เชิงประกอบ : ความรู้พื้นฐานและสมบัติ**. พิมพ์ครั้งที่ 1.  
 ปัตตานี : โรงพิมพ์ปัตตานีการช่าง.

ธีรยุทธ วิลวัลย์ และคนอื่นๆ. (2557). **อินฟราเรด สเปกโตรสโกปี**, เข้าถึงเมื่อ 30 พฤศจิกายน.  
 เข้าถึงได้จาก [http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course\\_info/2302275/ir-265.pdf](http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course_info/2302275/ir-265.pdf)

นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และ คณิตา ตังคณานุรักษ์. (2547). **สเปกโตรสโกปีด้านการวิเคราะห์**.  
 พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บัญชา พูลโกก. (2557). **ทฤษฎี IR**, เข้าถึงเมื่อ 29 กันยายน. เข้าถึงได้จาก  
[http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course\\_info/2302265/Spectro.pdf](http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course_info/2302265/Spectro.pdf)

บุญรอด วงษ์สวาท. (2558). **พอลิเมอร์เชิงควบแน่น**, เข้าถึงเมื่อ 14 มีนาคม.  
 เข้าถึงได้จาก [http://www.promma.ac.th/main/chemistry/boonrawd\\_site/condense.htm](http://www.promma.ac.th/main/chemistry/boonrawd_site/condense.htm)

พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์. (2537). **พลาสติก**. พิมพ์ครั้งที่ 11. กรุงเทพฯ : ห.จ.ก.ป. สัมพันธ์พาณิชย์.

แมน อมรสิทธิ์ และคนอื่นๆ. (2553). **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ**. กรุงเทพฯ :  
 บริษัท ชวนพิมพ์ 50 จำกัด.

ศักดิ์สิทธิ์ จันทร์ไทย. (2553). **การวิเคราะห์เชิงความร้อนและแคลอริเมทรี**. พิมพ์ครั้งที่ 1. ขอนแก่น  
 : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สุนันท์ สายกระสุน. (2553). การวิเคราะห์เชิงความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 1. มหาสารคาม : สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

### ภาษาต่างประเทศ

**Aramids.** (2015), accessed March 14. Available from

<http://www.pslc.ws/macrog/kidsmac/nylon.htm>

Causin, Valerio and others. (2009). "A Method Based on Thermogravimetry/Differential Scanning Calorimetry for the Forensic Differentiation of Latex Gloves." **Forensic Science International** 188, 14 (April): 57-63.

Causin, Valerio and others. (2006). "A quantitative differentiation method for plastic bags by infrared spectroscopy, thickness measurement and differential scanning calorimetry for tracing the source of illegal drugs." **Forensic Science International** 164, 23 (January) : 148-154.

Causin, Valerio and others. (2007). "A quantitative differentiation method for plastic bags by wide angle X-ray diffraction for tracing the source of illegal drugs." **Forensic Science International** 168, 18 (July): 37-41.

Causin, Valerio and others. (2006). "Forensic analysis of acrylic fibers by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry." **Analytical Applied Pyrolysis** 75, 11 (July) : 43-48.

Farah, Shady and others. (2014). "Morphological, spectral and chromatography analysis and forensic comparison of PET fibers." **Talanta** 123, 5 (February): 54-62.

**Fluorinated ethylene propylene (FEP) copolymer.** (2015). accessed March 21. Available from <http://www.google.com/patents/EP1667752A4?cl=en>

- Haines, P.J. and others. (2002). "Principles of Thermal Analysis and Calorimetry." **The Royal Society of Chemistry**, Thomas Graham House, Cambridge.
- H. Rajandas and others. (2012). "A novel FTIR-ATR spectroscopy based technique for the estimation of low-density polyethylene biodegradation." **Polymer Testing** 31, 25 (July): 1094-1099.
- Huang, Xianbo and others. (2006). "Mechanistic study on flame retardance of polycarbonate with a small amount of potassium perfluorobutane sulfonate by TGA-FTIR/XPS." **Polymer Degradation and Stability** 91, 3 (March): 606-613.
- Huijun, Wu and others. (2008). "Measurement of radiative thermal properties of thin polymer films by FTIR" **Polymer Testing** 27, 2 (October) :122-128.
- Interferometer**. (2015). accessed March 22. Available from <http://elchem.kaist.ac.kr/vt/chem-ed/optics/selector/michelson.htm>
- Ju, Hua and others. (2012). "Methyl Methacrylate (MMA)-Grafted Polypropylene (PP) Separator for Rechargeable Lithium Metal Battery." **ECS Electrochemistry Letters** 1, 24 (August): A59-A62.
- Magdalena, Chipara and others. (2008). "TGA analysis of polypropylene/carbon nanofibers composites." **Polymer Degradation and Stability** 93, 12 (January): 871-876.
- Nomex**. (2015) accessed March 14. Available from [http://www.chem.uwec.edu/Chem405\\_s01/malenirf/project.html](http://www.chem.uwec.edu/Chem405_s01/malenirf/project.html)
- P.A. Hayes, Signe Vahur and Ivo Leito. (2014). "ATR-FTIR spectroscopy and quantitative multivariate analysis of paints and coating materials." **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy** 6 (May).
- Perfluoroalkoxy**. (2015). accessed March 21. Available from [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PFA\\_structure.PNG](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PFA_structure.PNG)



Peydro, M.A. and others. (2013). "Study of the thermal properties of acrylonitrile butadiene styrene-high impact polystyrene blends with styrene ethylene butylene styrene." **fascicle of Management and Technological Engineering**. 1 (May): 273-276.

**Polycarbonate**. (2015). accessed March 14. Available from

<http://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polycarbonates.html>

**Polyetherimide**. (2015). accessed March 21. Available from

<http://en.wikipedia.org/wiki/Polyetherimide>

**Polyetherketone**. (2015). accessed March 21. Available from

<http://www.google.com/patents/US20110288244>

**Polyetherketoneetherketoneketone**. (2015) accessed March 21. Available from

<http://www.google.com/patents/EP2145913B1?cl=en>

**Polyethersulfone**. (2015). accessed March 21. Available from

<http://www.google.com/patents/US20130062285>

**Polyhexafluoropropylene**. (2015) accessed March 21. Available from

<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/295388?lang=en&region=TH>

**Polyimide**. (2015). accessed March 21. Available from

<http://www.inpia.ir/news/news.php?id=2080>

**Polyamideimide**. (2015). accessed March 21. Available from

<http://www.google.com/patents/EP1414906A1?cl=en>

**Poly(methyl methacrylate)**. (2015). accessed March 14. Available from

<http://www.pslc.ws/macrog/kidsmac/pmma.htm>

**Polyoxymethylene**. (2015). accessed March 14. Available from

<http://en.wikipedia.org/wiki/Polyoxymethylene>

**Polyphenyleneoxide.** (2015). accessed March 21. Available from

<http://www.pslc.ws/macrog/ppo.htm>

**Polyphenylenesulfide.** (2015). accessed March 21. Available from

<http://www.pslc.ws/macrog/pps.htm>

**Polystyrene.** (2015). accessed March 14. Available from <http://en.wikipedia.org/wiki/Polystyrene>

**Polysulfone.** (2015). accessed March 21. Available from

<https://www.google.com/patents/US8110639>

**Polytetrafluoroethylene.** (2015). accessed March 21. Available from

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PTFE\\_structure.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PTFE_structure.png)

**Poly(vinyl acetate).** (2015). accessed March 14. Available from <http://pslc.ws/macrog/pva.htm>

**Poly(vinyl chloride).** (2015). accessed March 14; Available from

<http://www.pslc.ws/macrog/pvc.htm>

Sajwan, Madhuri., Saroj Aggarwal, and R.B. Singh. (2008). "Forensic characterization of HDPE Pipes by DSC." **Forensic Science International** 175, 13 (July): 130-131.

Taylor, Erica and others. (2008). "Stable isotope ratio mass spectrometry and physical comparison for the forensic examination of grip-seal plastic bags." **Forensic Science International** 177, 4 (Mach): 214-220.

**Udel.** (2015). accessed March 21. Available from [http://en.wikipedia.org/wiki/4,4%27-Dichlorodiphenyl\\_sulfone](http://en.wikipedia.org/wiki/4,4%27-Dichlorodiphenyl_sulfone)



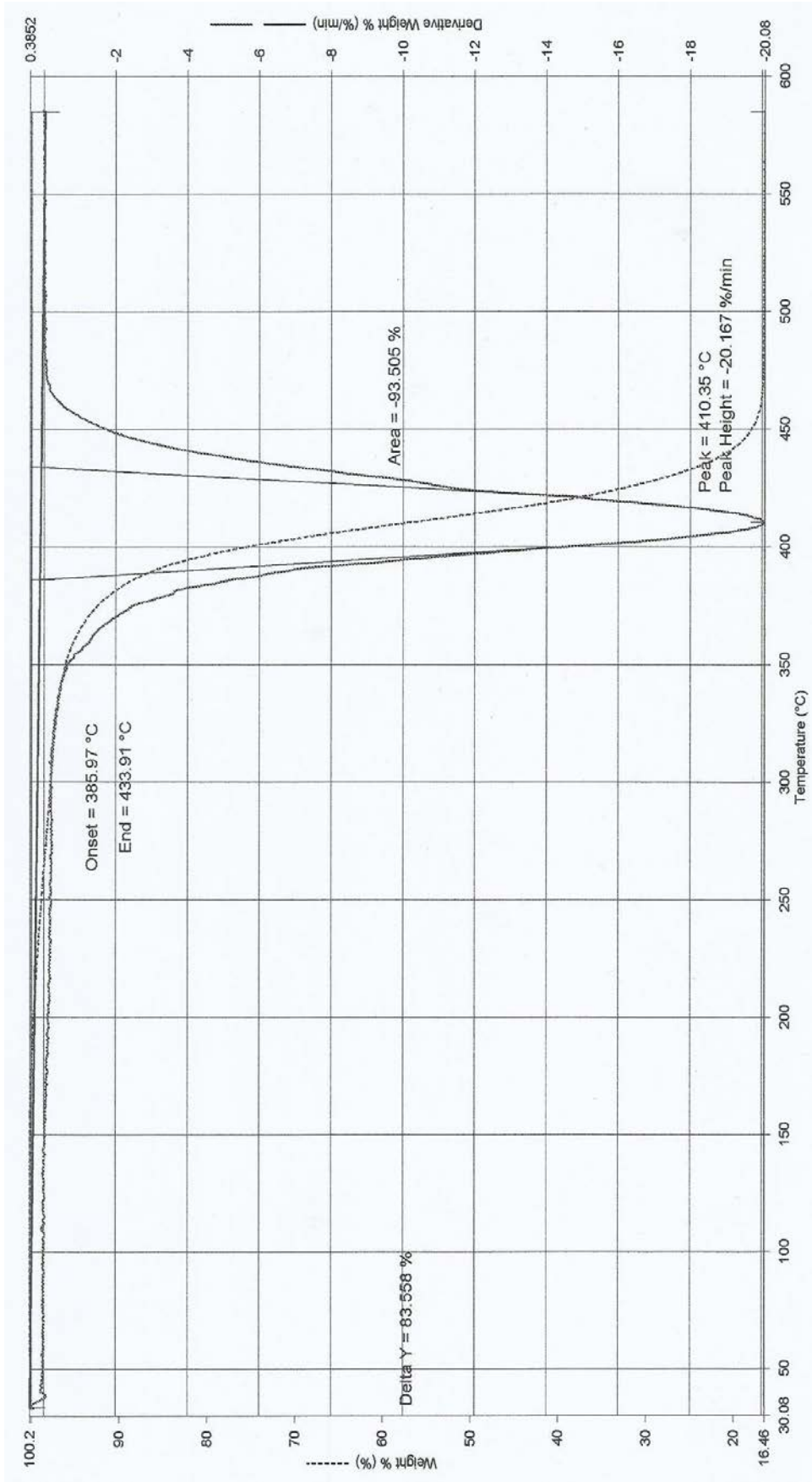
ภาคผนวก



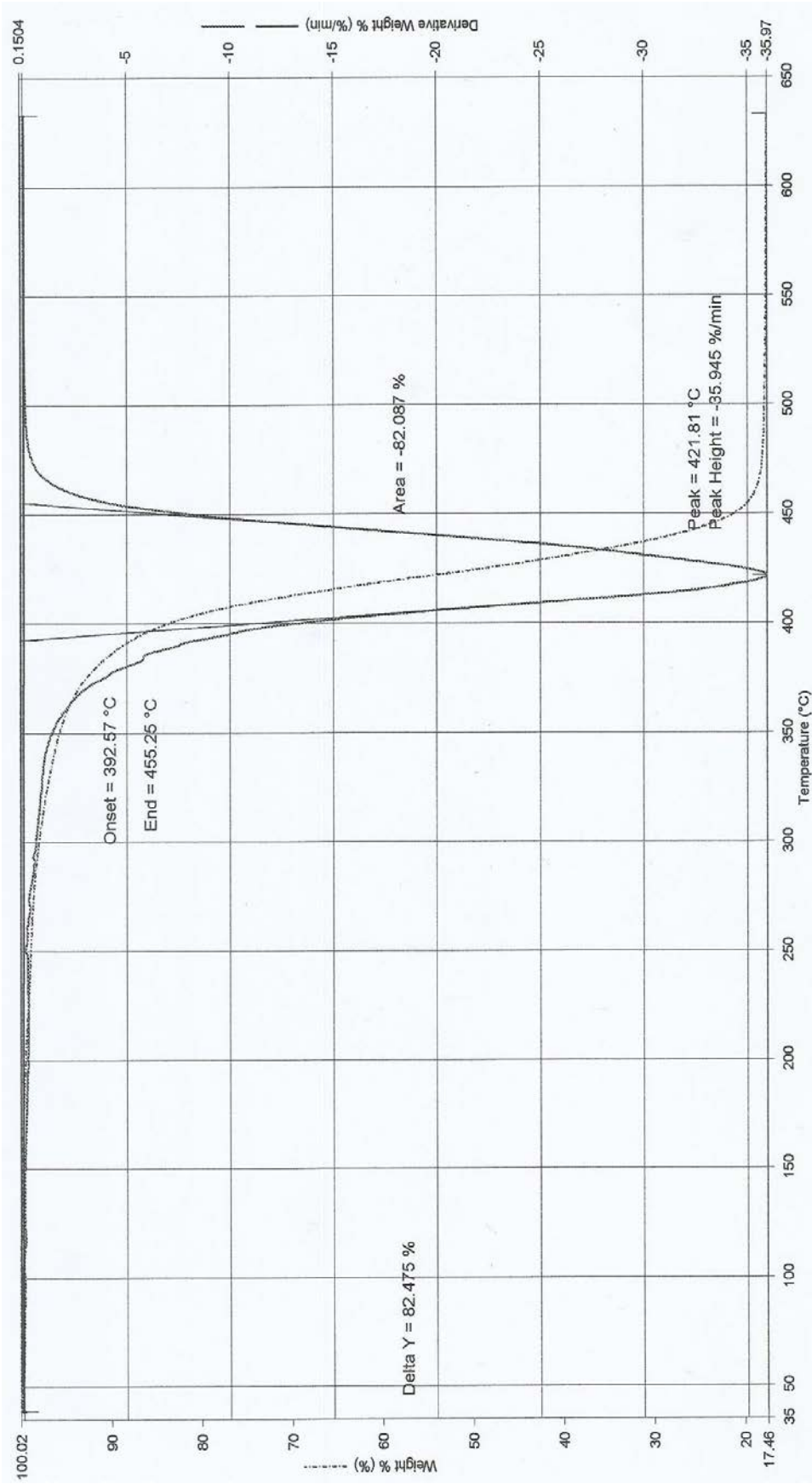
ภาคผนวก ก

เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค TGA

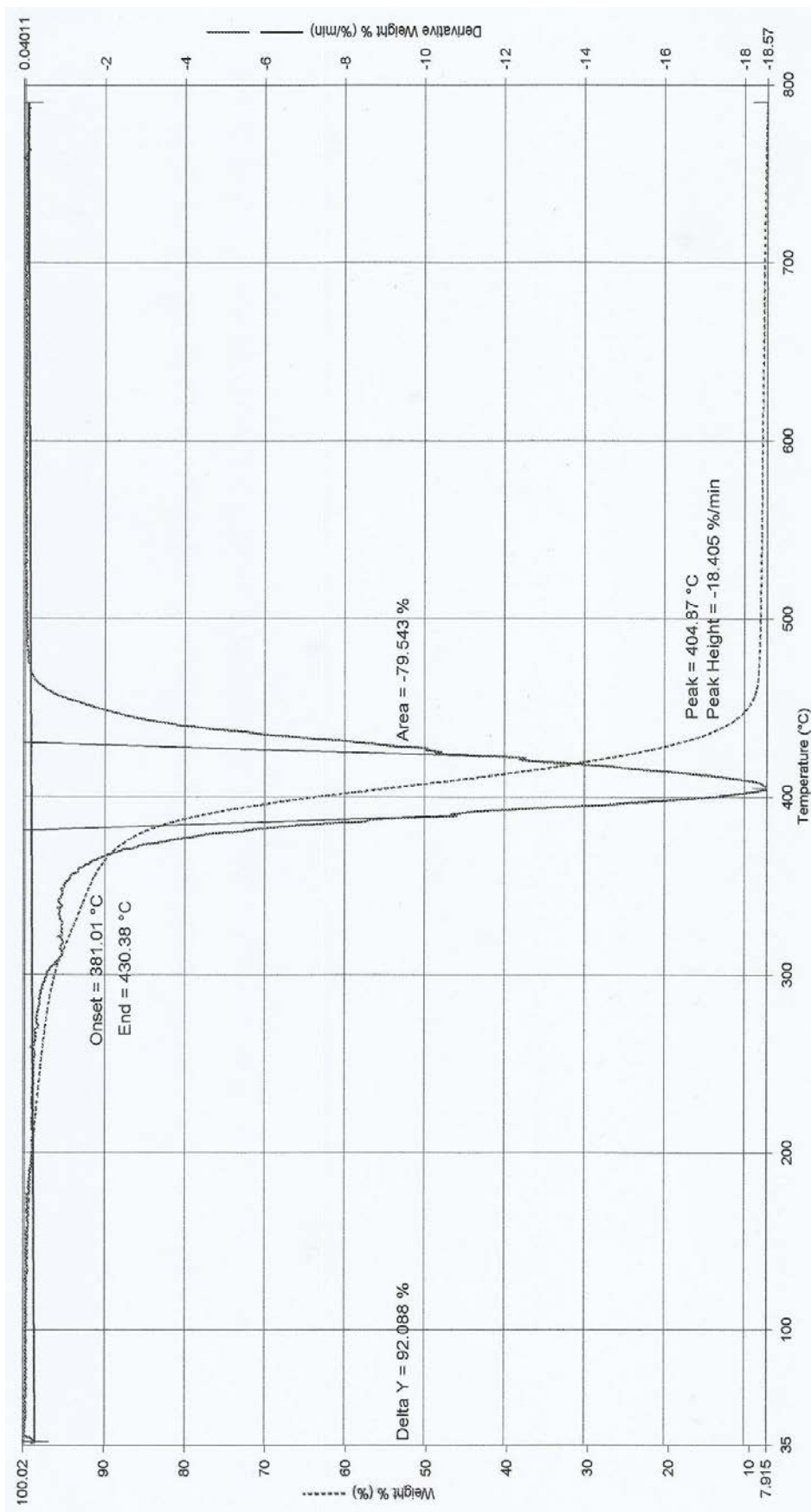
มหาวิทยาลัยศิลปากร



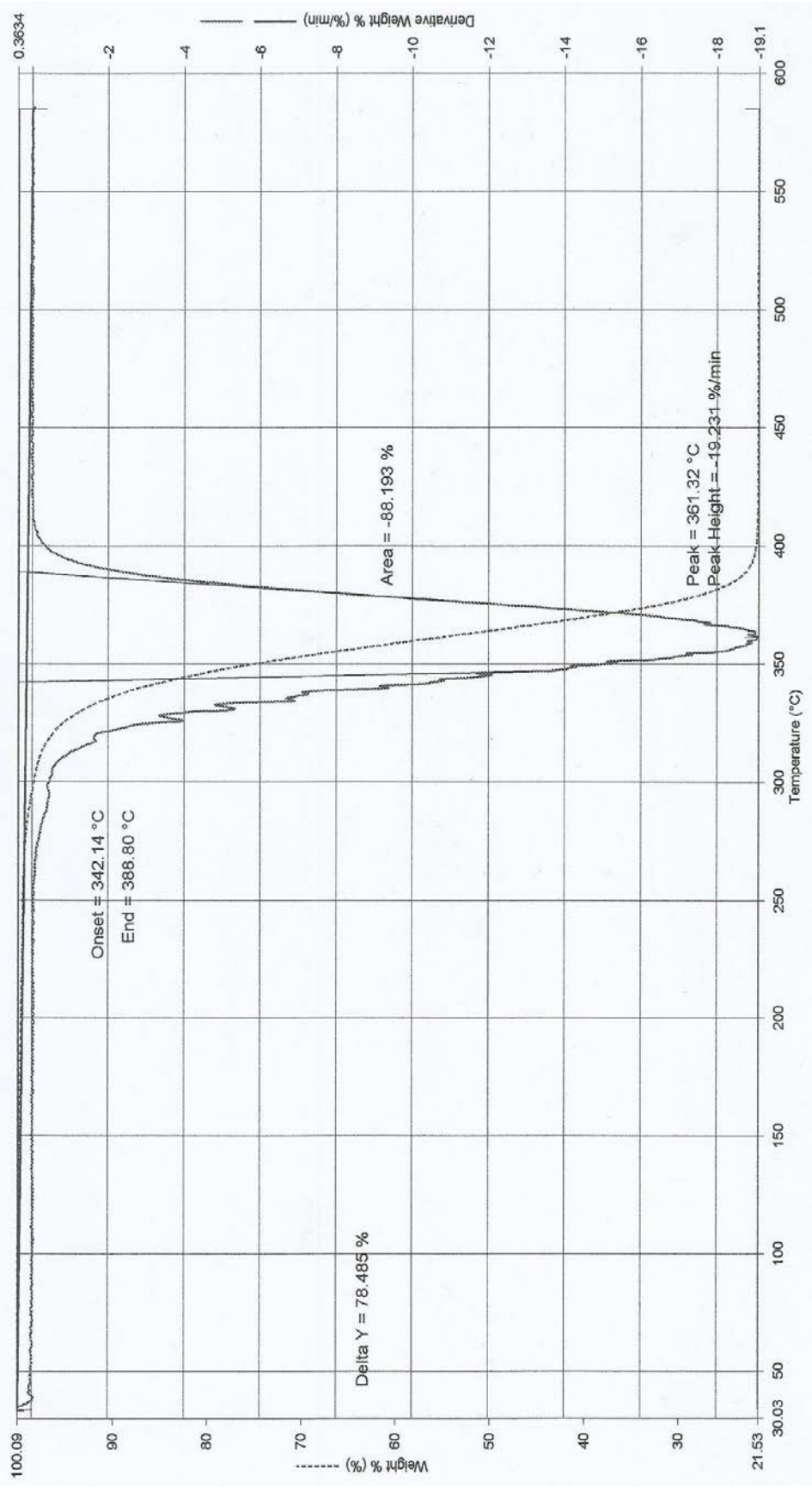
ภาพที่ 48 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกหุ้มฝาครอบ Honda-Hcover



ภาพที่ 49 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกบ่มหน้า HONDA-WH

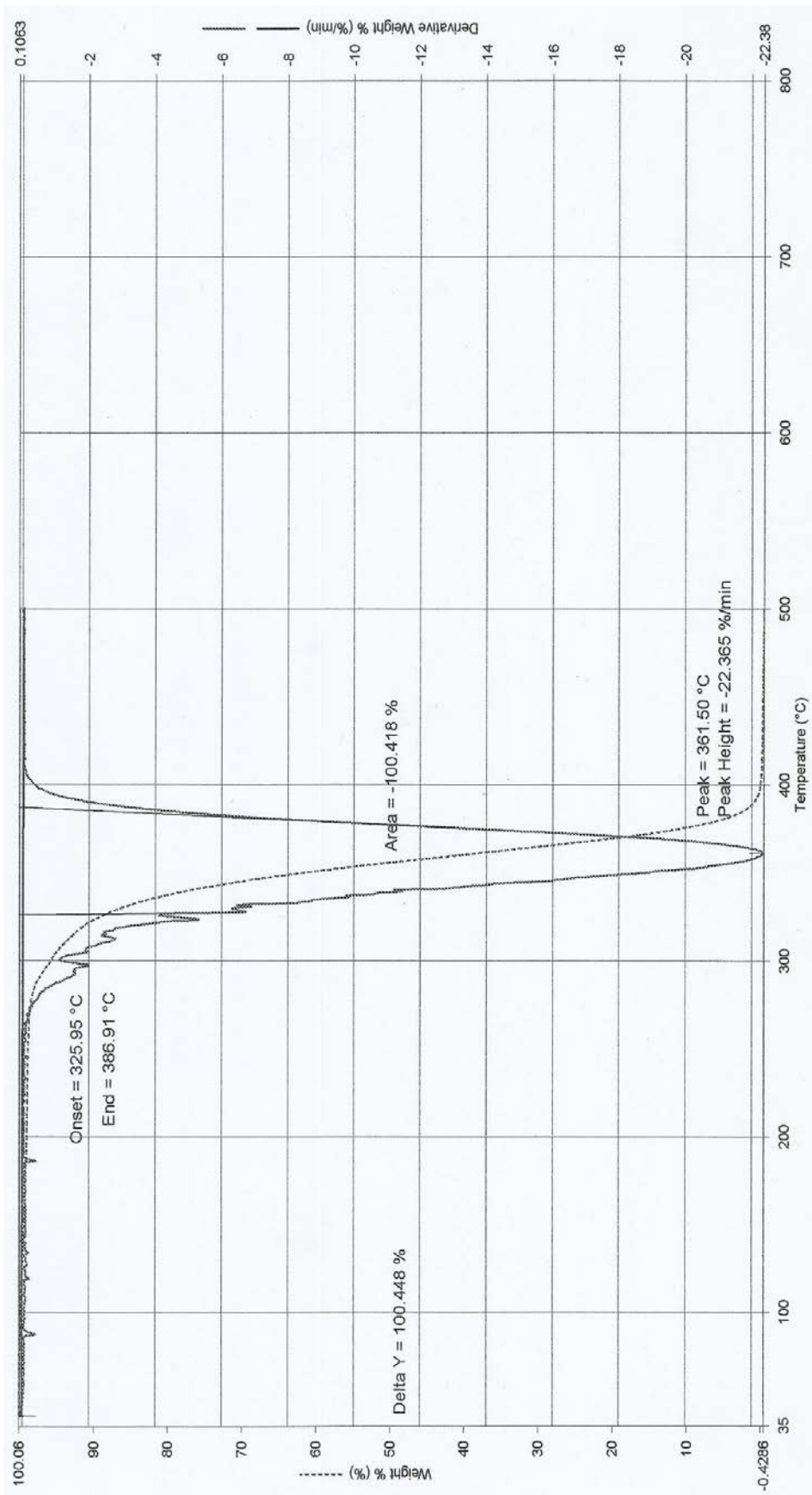


ภาพที่ 50 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกบ่งโคลนหน้า HONDA-RH

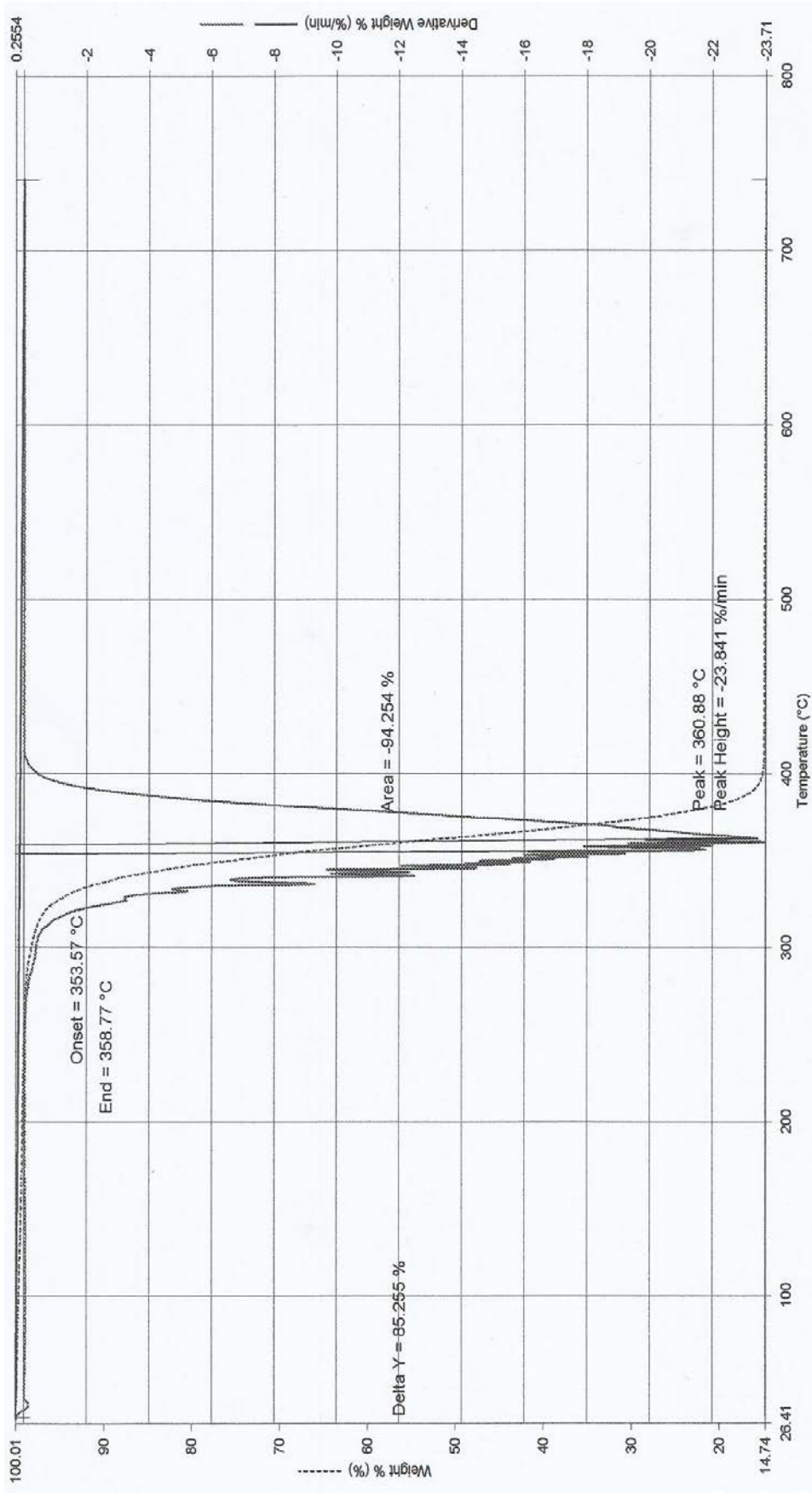


ภาพที่ 51 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกโคมไฟหน้า HONDA-LampH

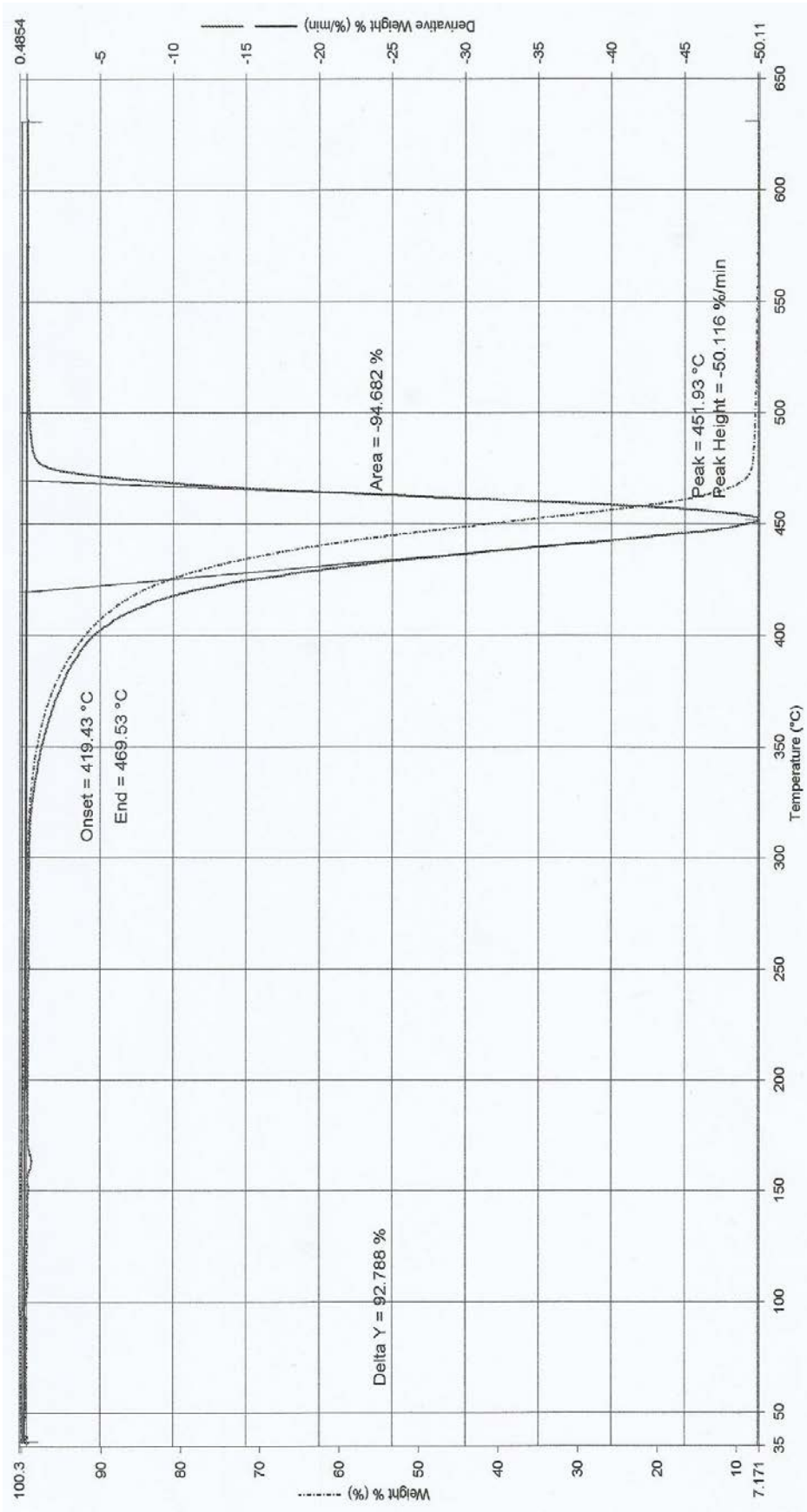




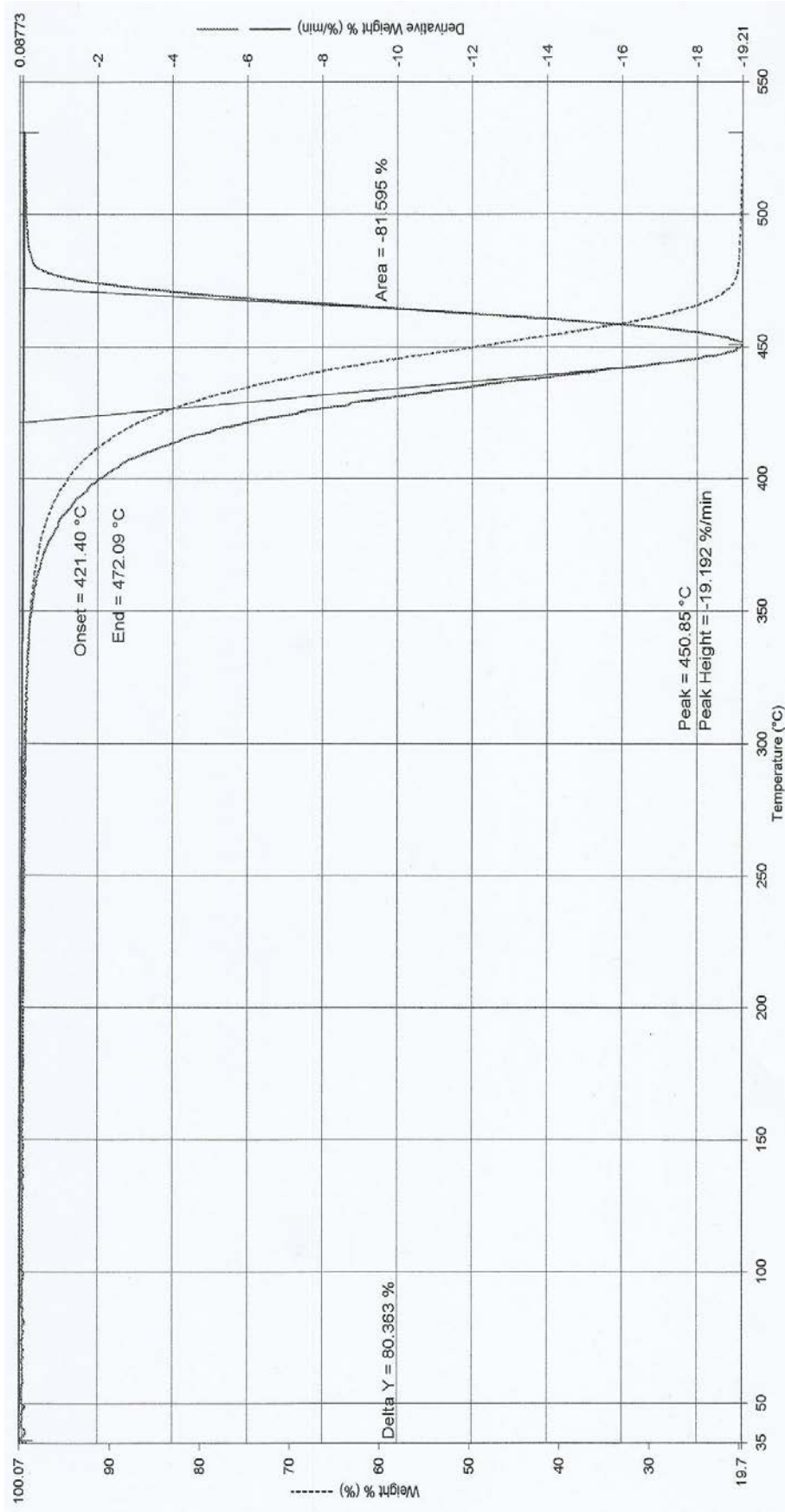
ภาพที่ 52 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกไฟไลวน้ำ HONDA-LH



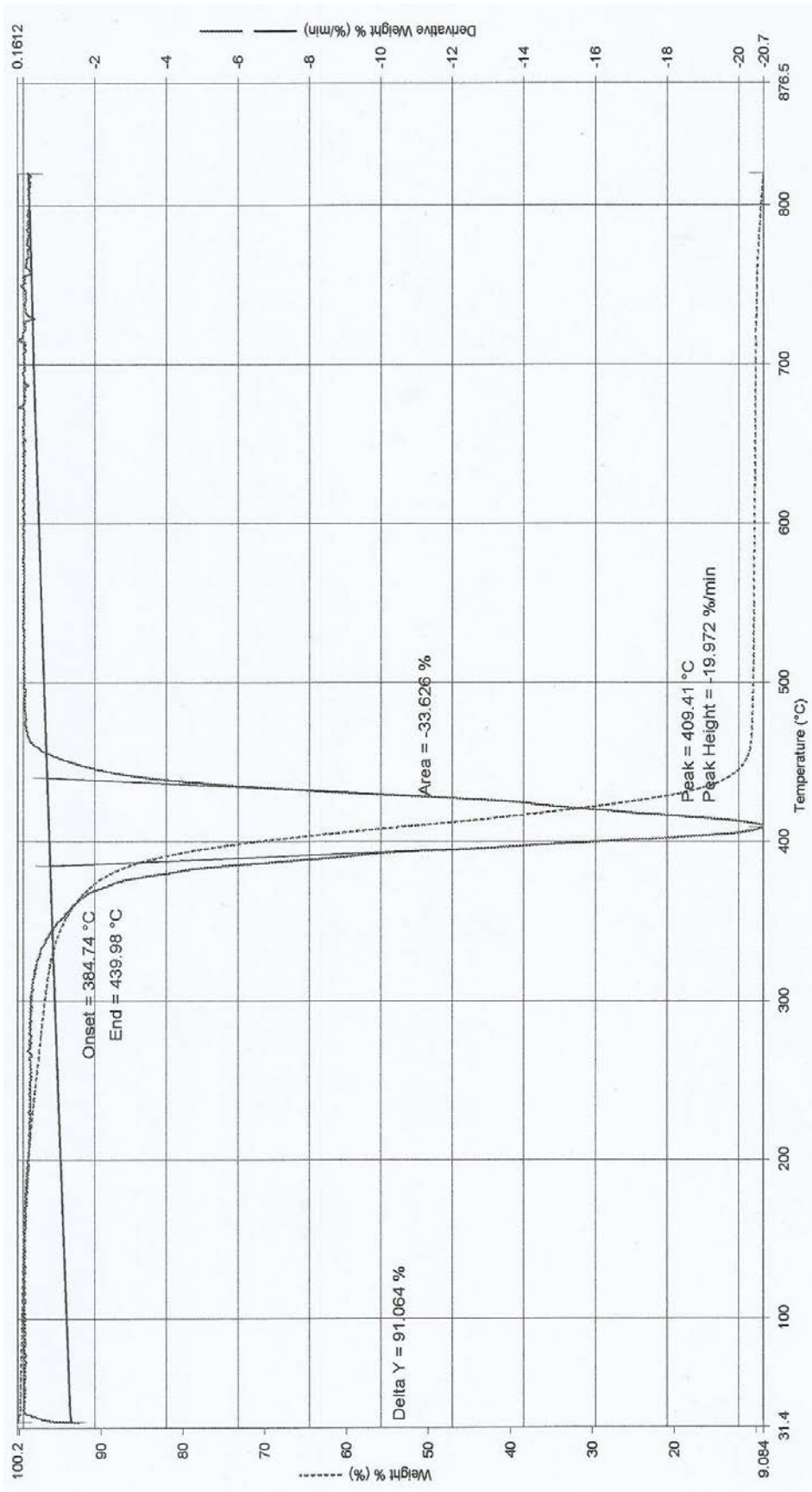
ภาพที่ 53 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกไฟเลียหลัง HONDA-LT



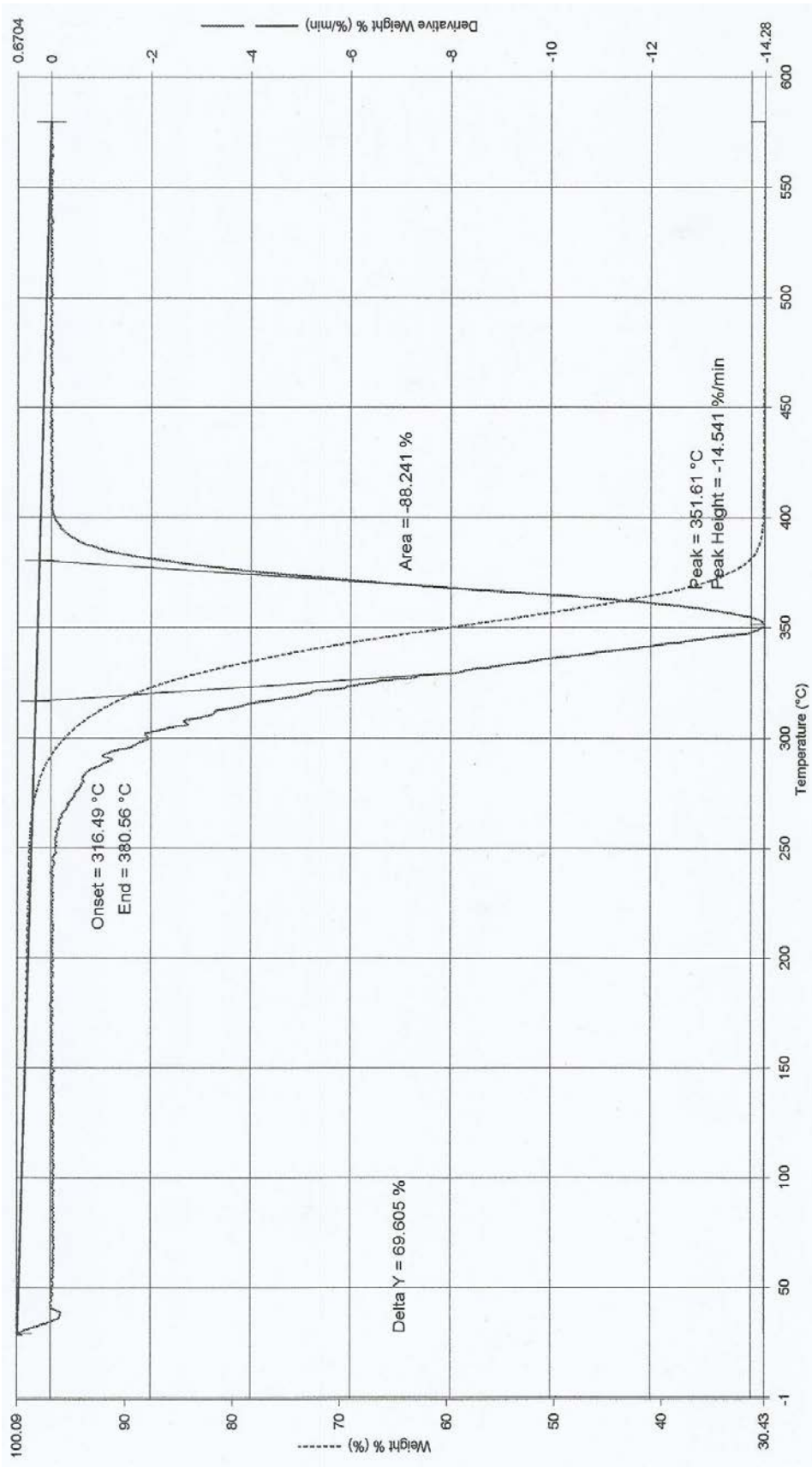
ภาพที่ 54 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกใต้เครื่องยนต์ HONDA-Under



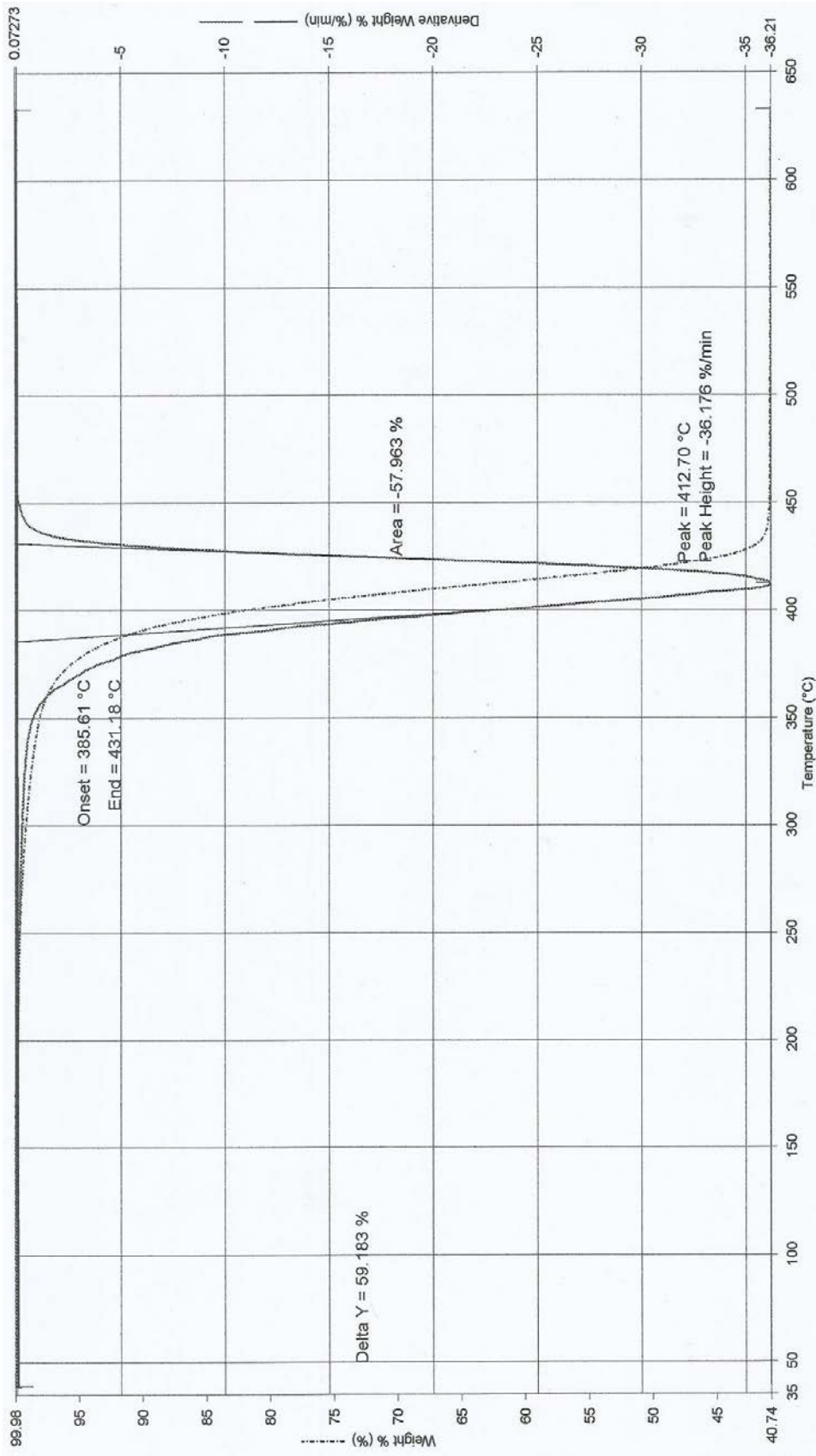
ภาพที่ 55 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกบักโตนหลัง HONDA-RT



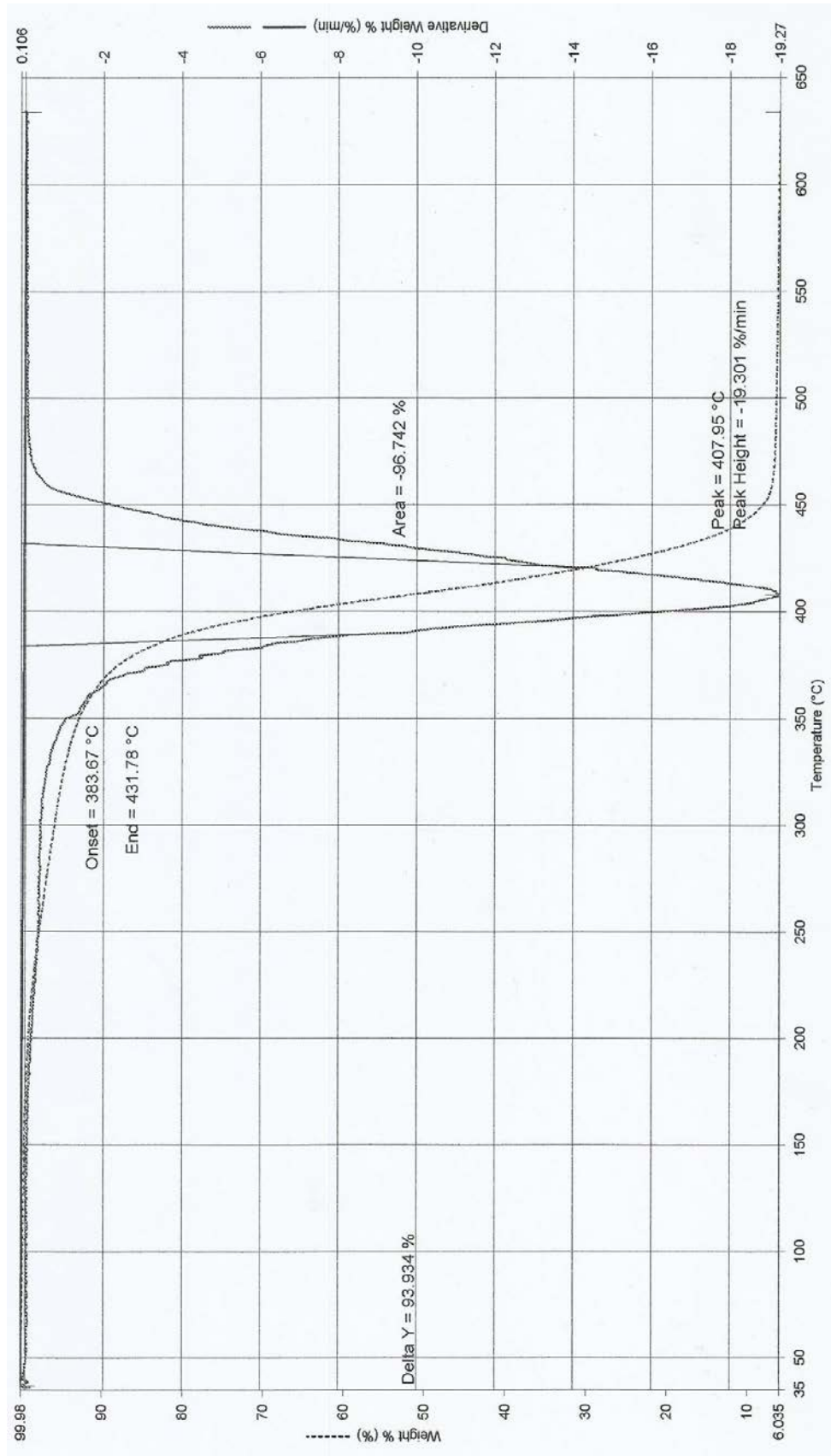
ภาพที่ 56 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกคอมพาวด์ HONDA-BB



ภาพที่ 57 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกกรอบรีนอนัครอบ HONDA-Mcover

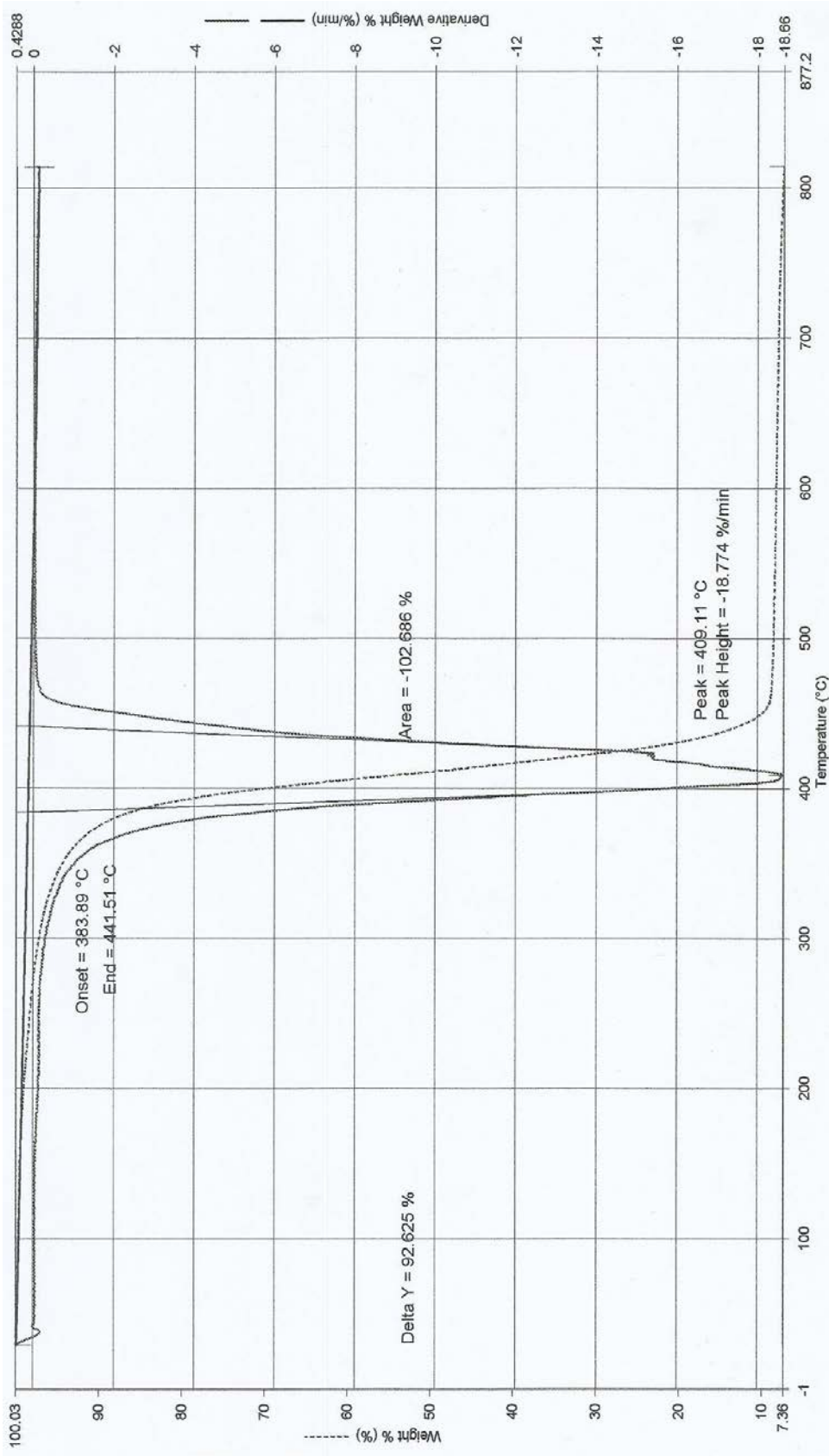


ภาพที่ 58 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกโคมไฟหลัง HONDA-LampT

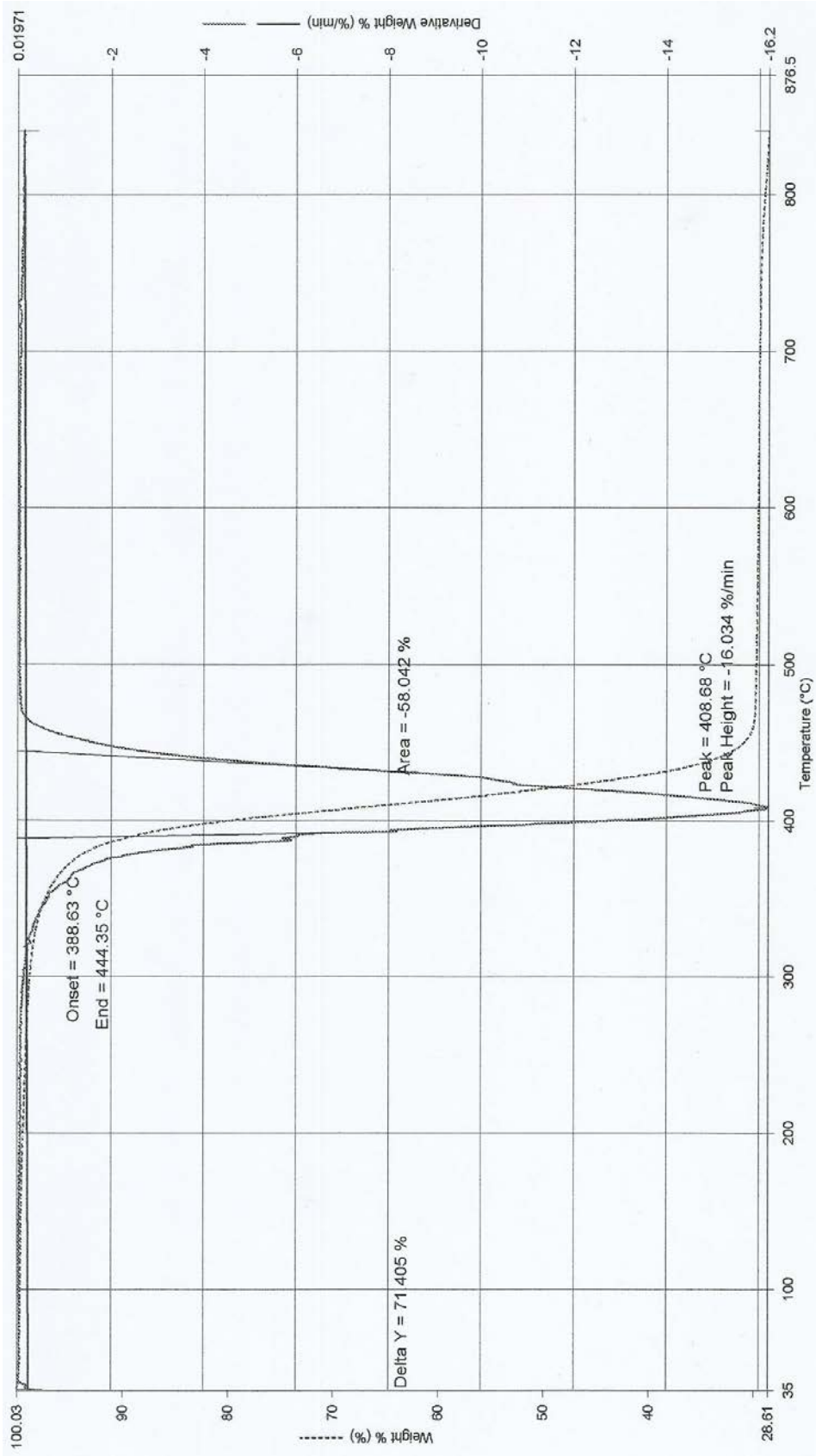


ภาพที่ 59 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกคอมแพคเตอร์ SUZUKI-Hcover

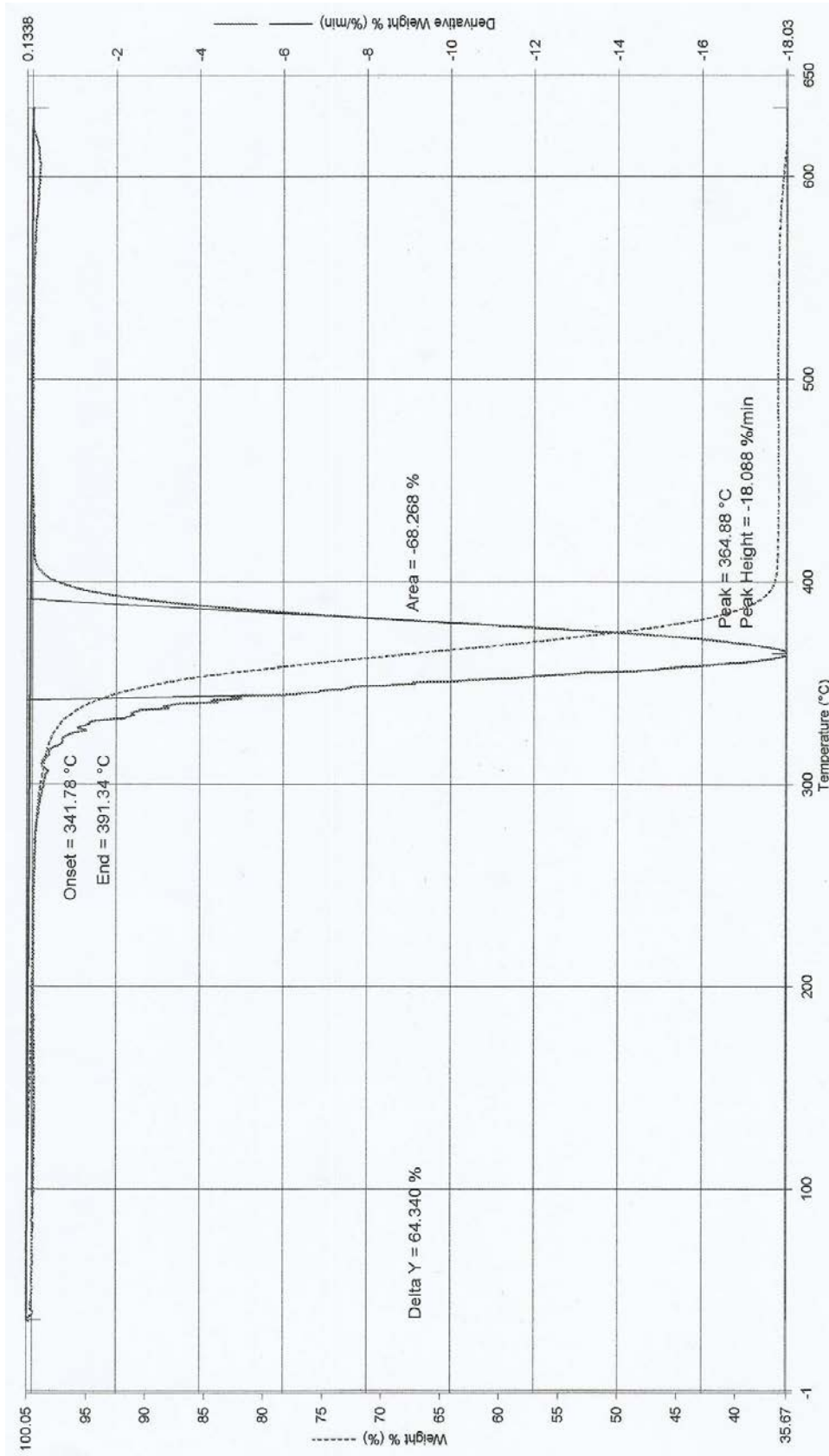




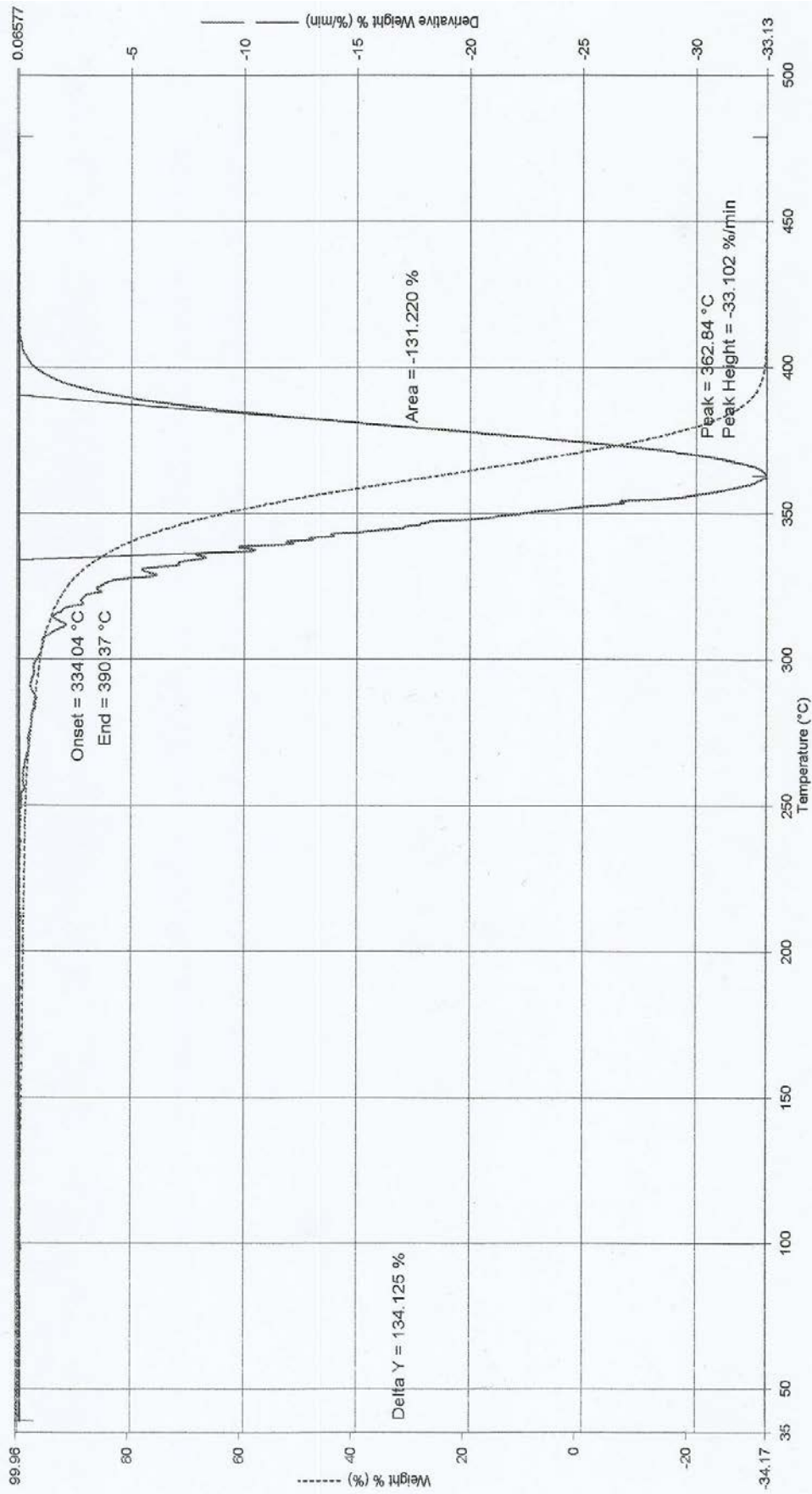
ภาพที่ 60 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกบ่งหม่น้ำ SUZUKI-WH



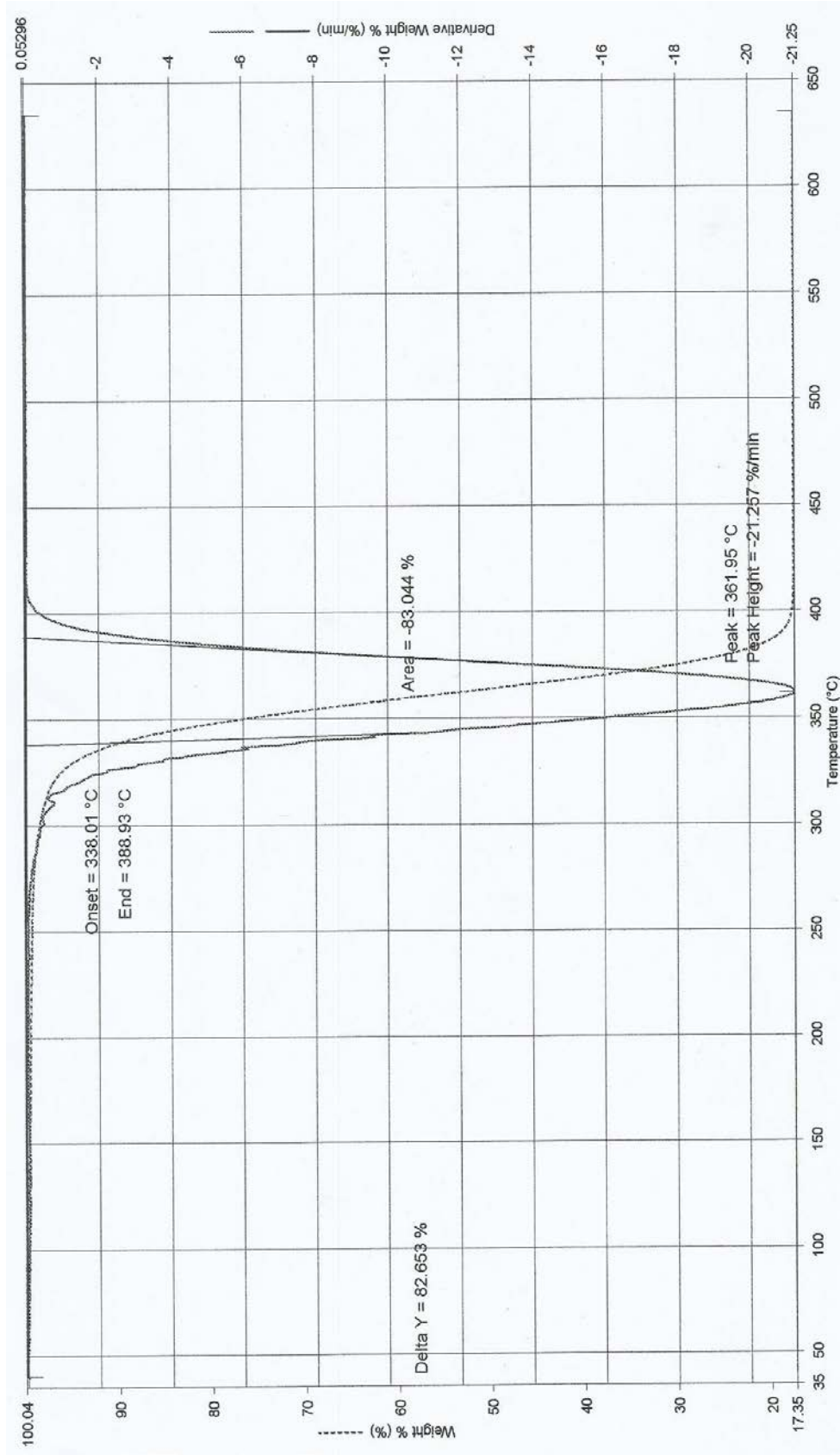
ภาพที่ 61 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกบ่งโคคณหน้า SUZUKI-RH



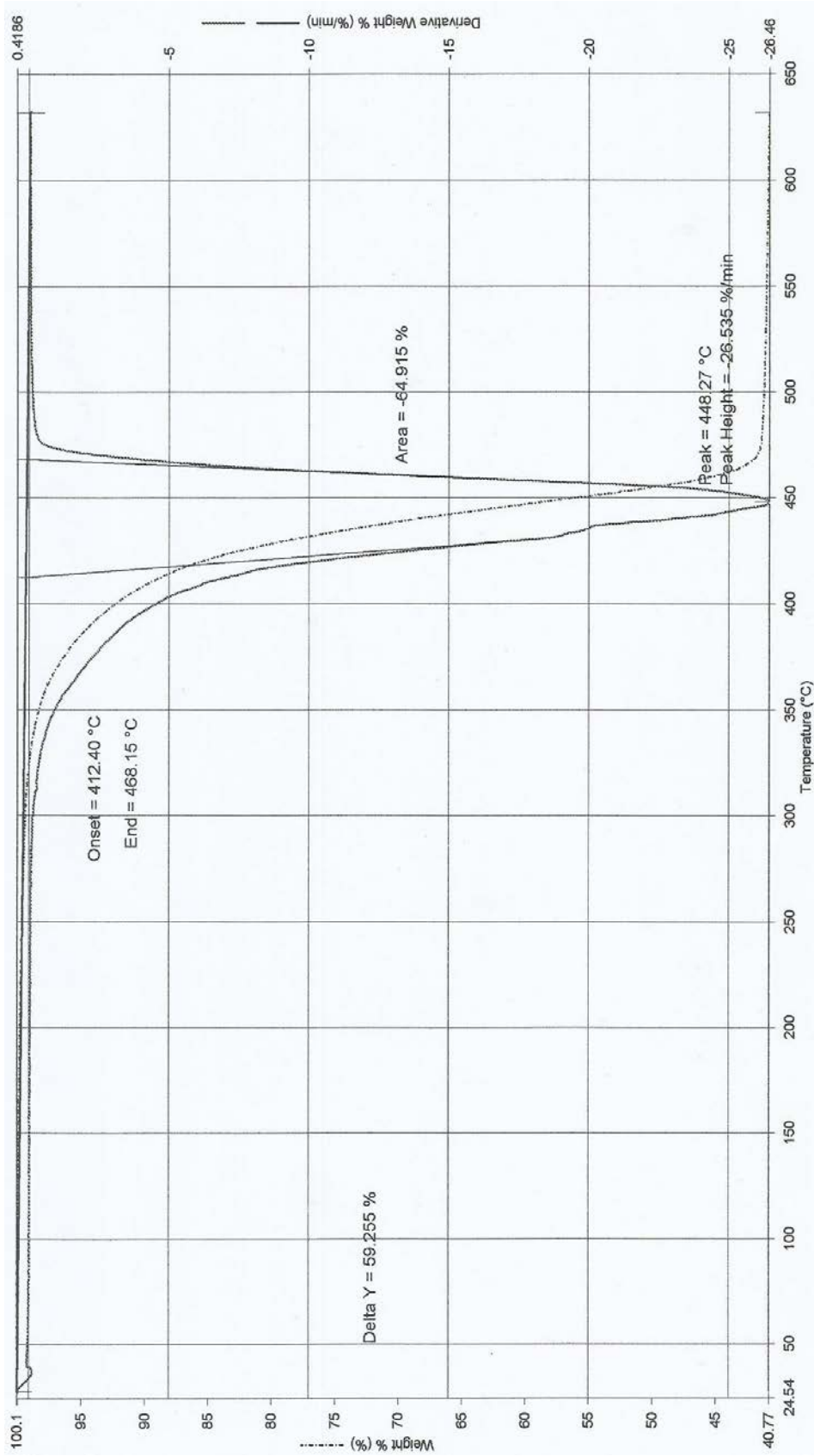
ภาพที่ 62 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกโคมไฟหน้า SUZUKI-LampH



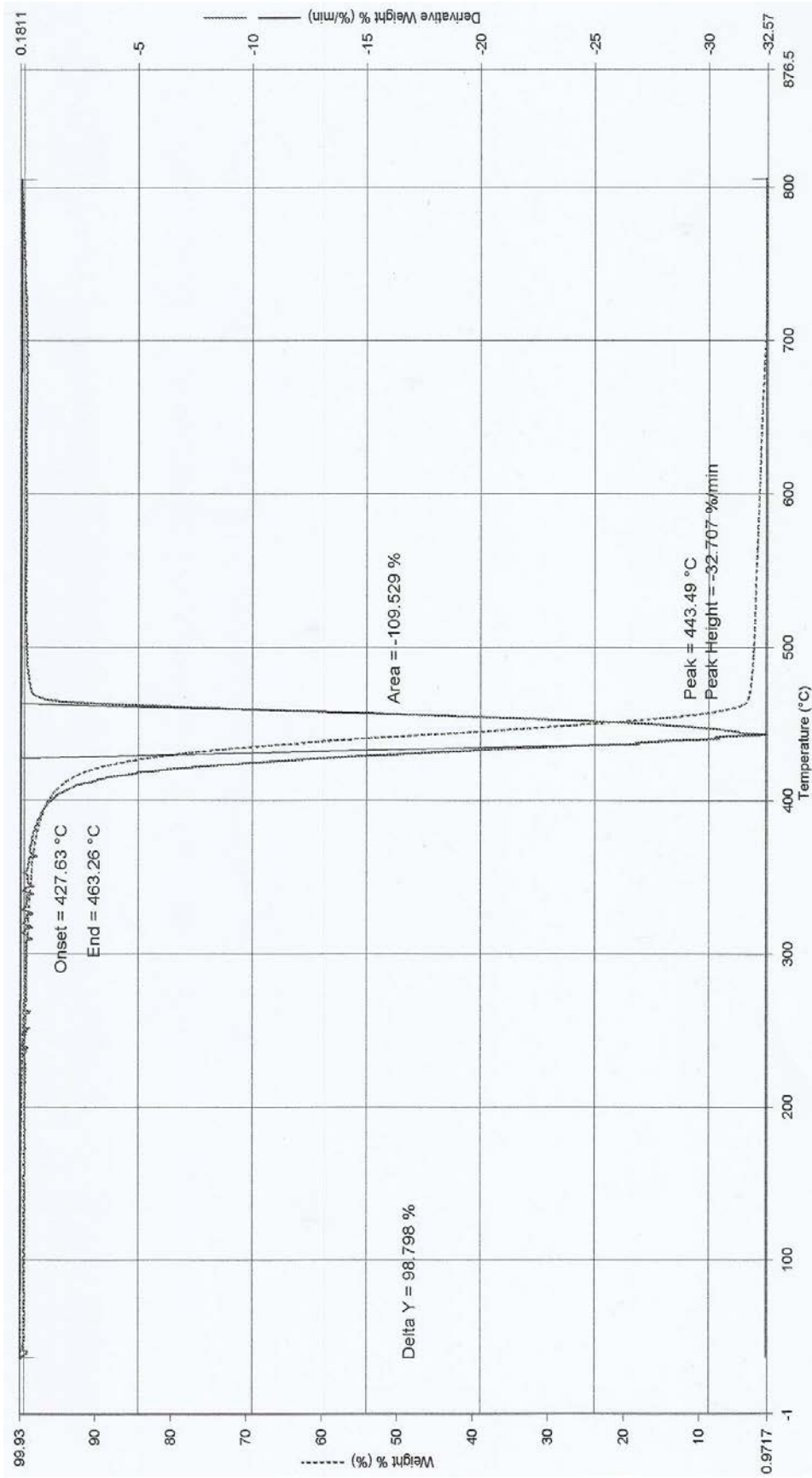
ภาพที่ 63 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกโพลีเอทิลีน SUZUKI-LH



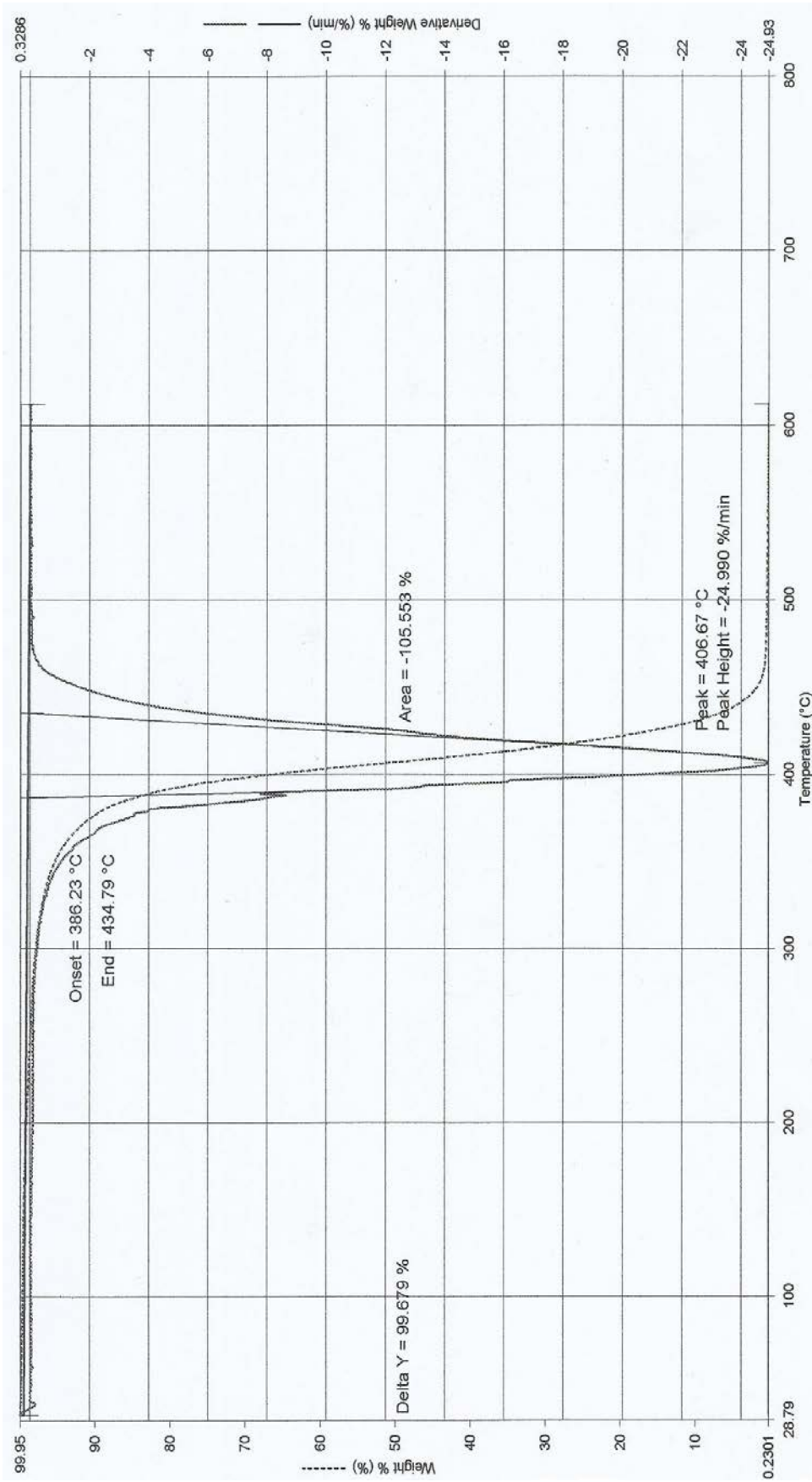
ภาพที่ 64 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกไฟเดี่ยหลัง SUZUKI-LT



ภาพที่ 65 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกใต้เครื่องยนต์ SUZUKI-Under

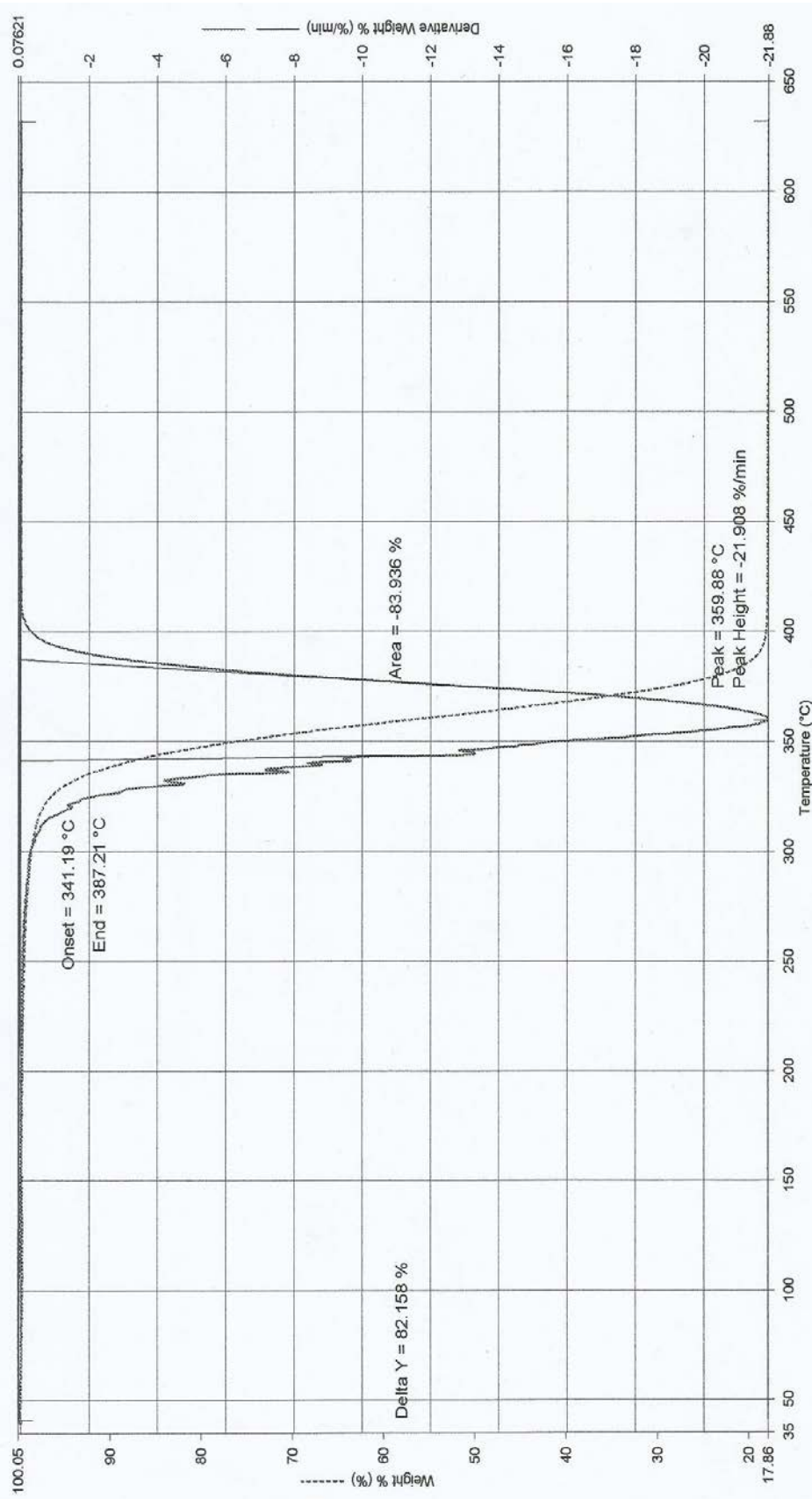


ภาพที่ 66 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกบ่ง โคลนหลัง SUZUKI-RT

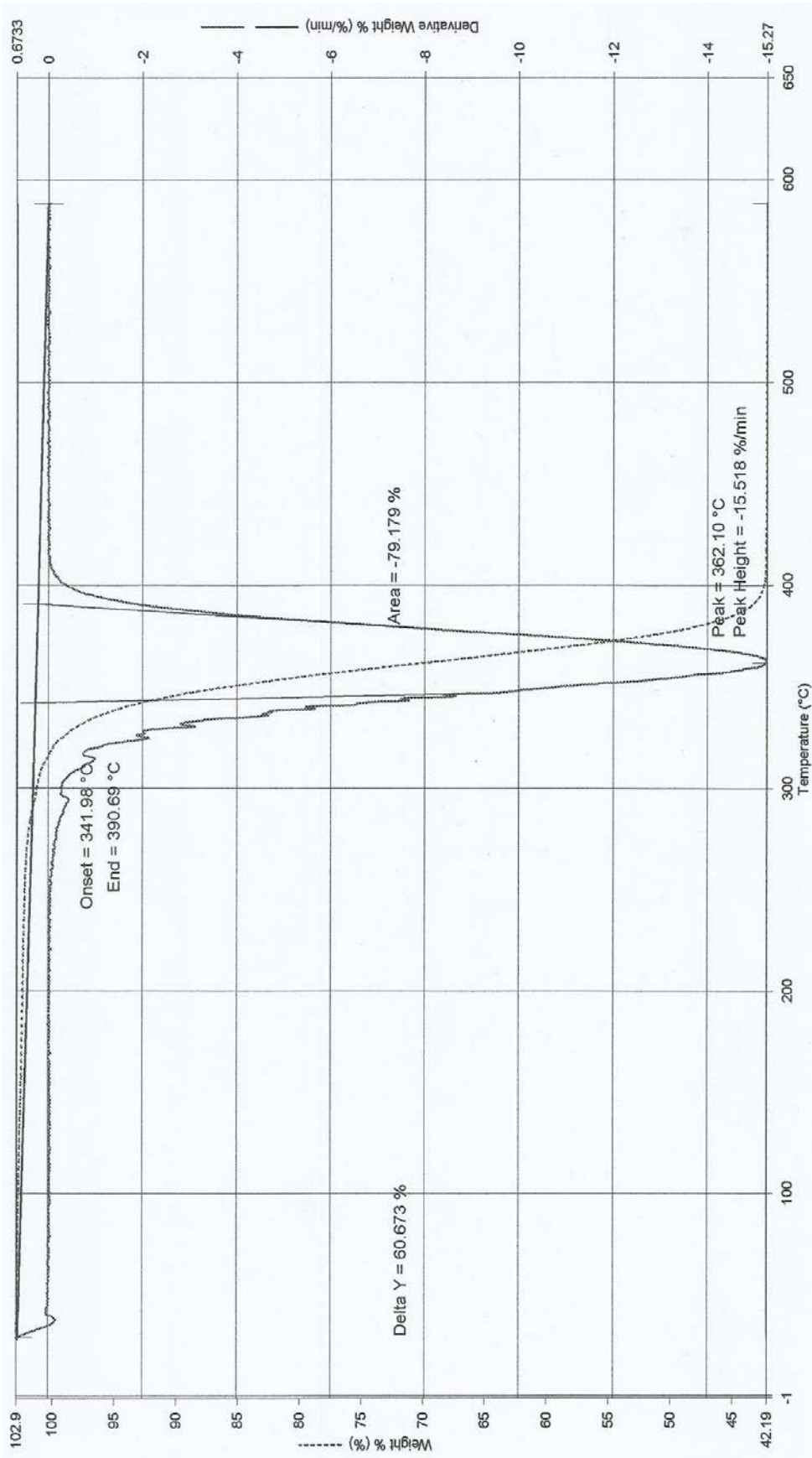


ภาพที่ 67 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกคอมปาว์ด SUZUKI-BB

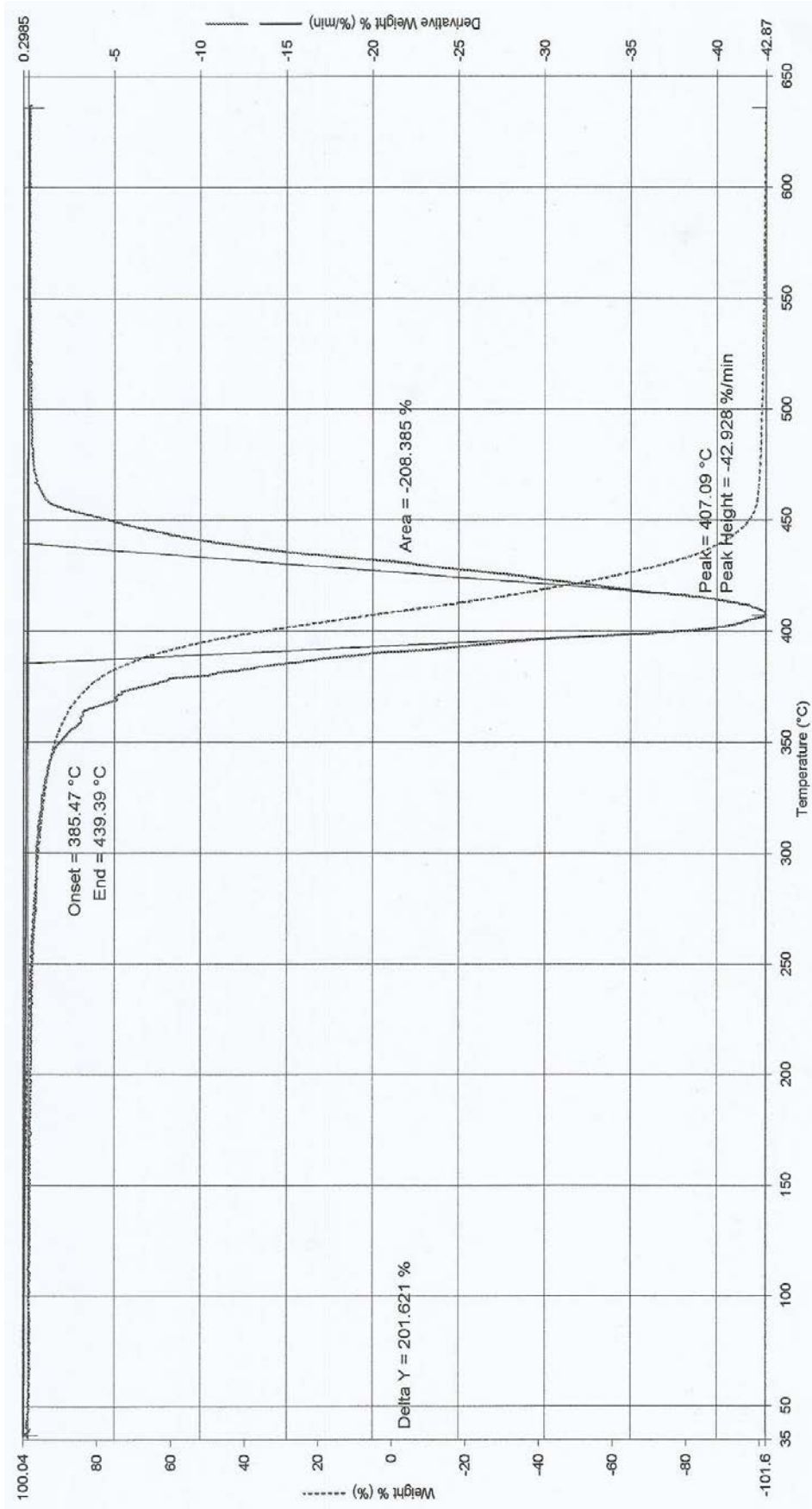




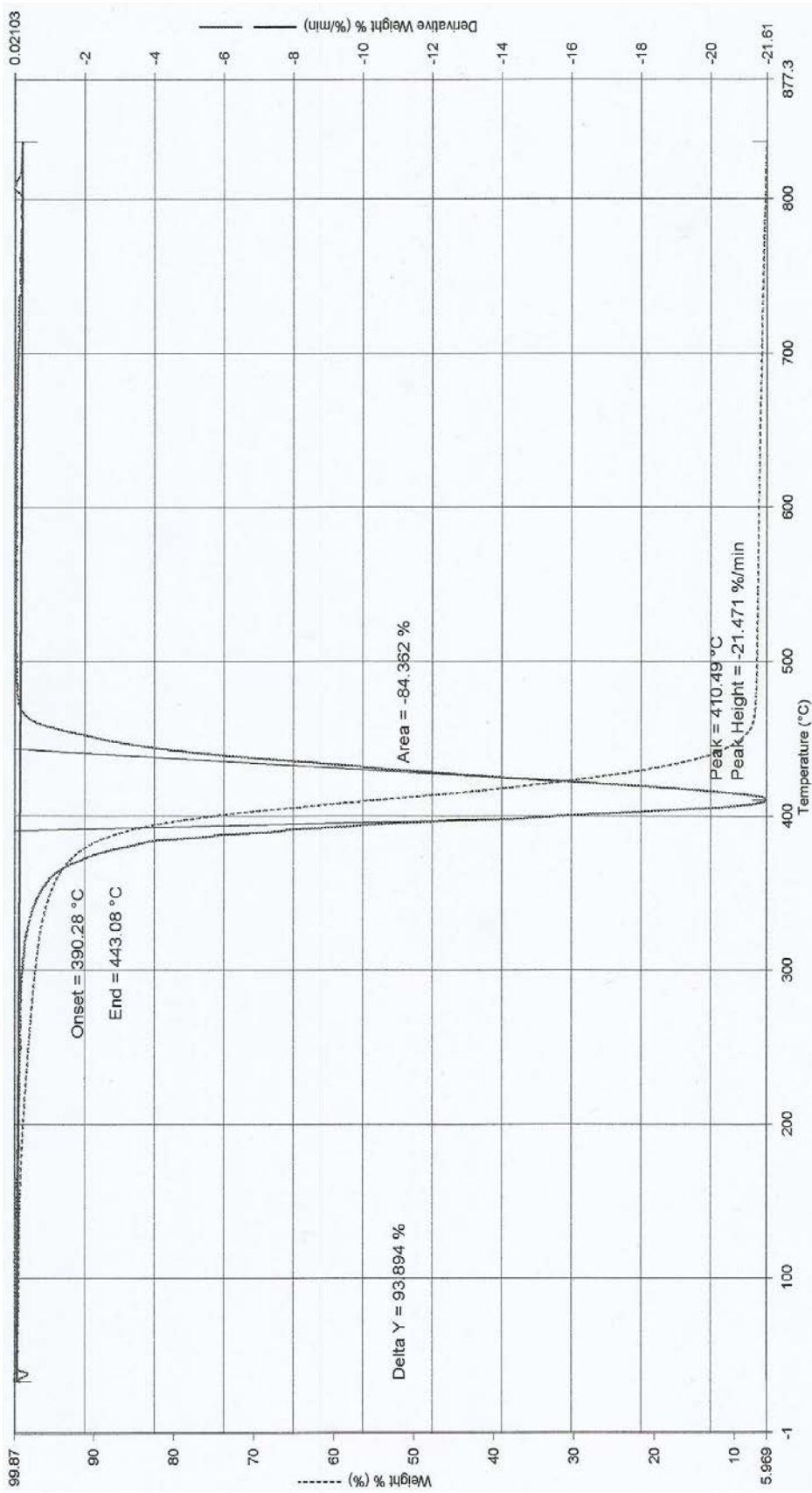
ภาพที่ 68 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกครอบเรือนวัดรอบ SUZUKI-Mcover



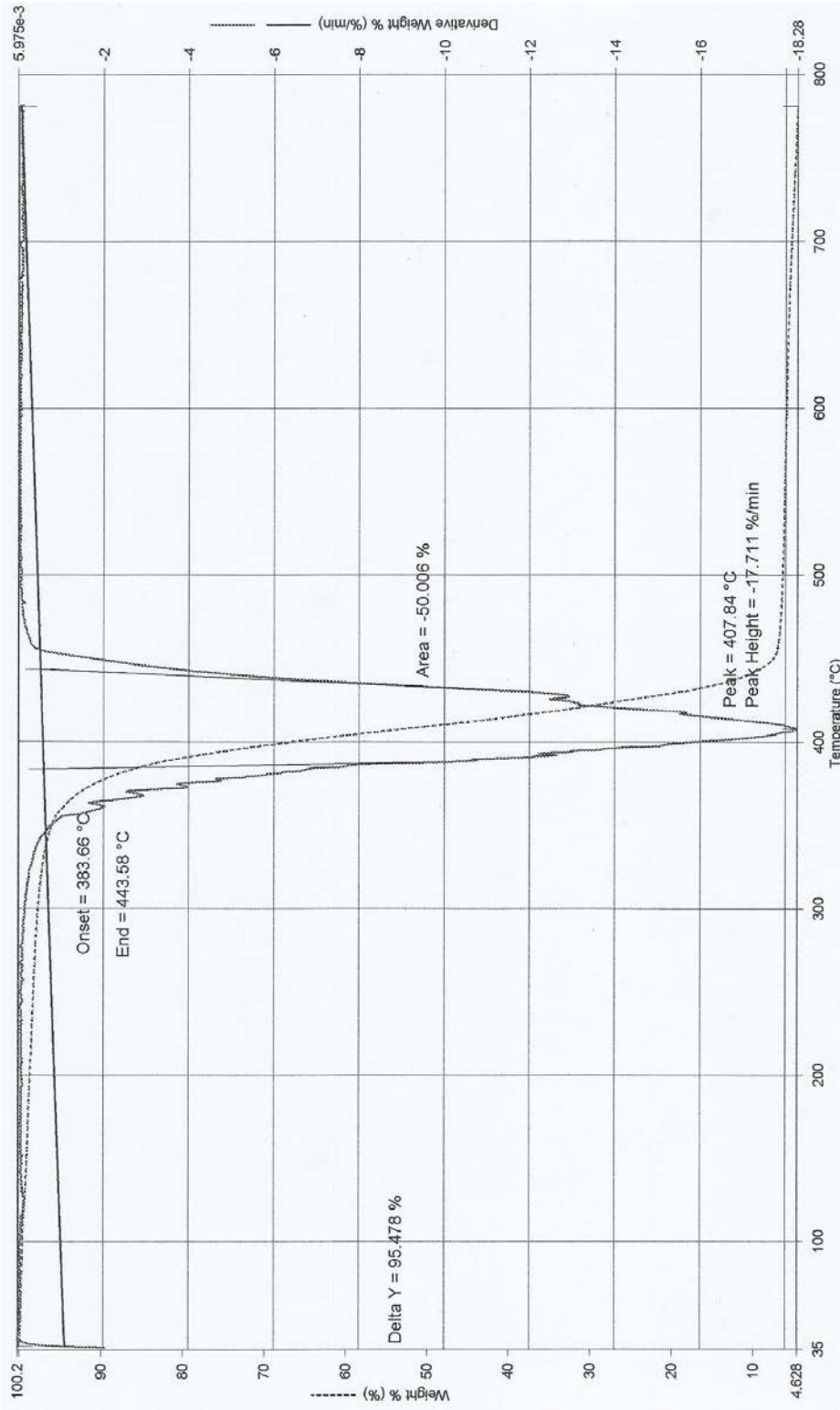
ภาพที่ 69 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกโคมไฟหลัง SUZUKI-LampT



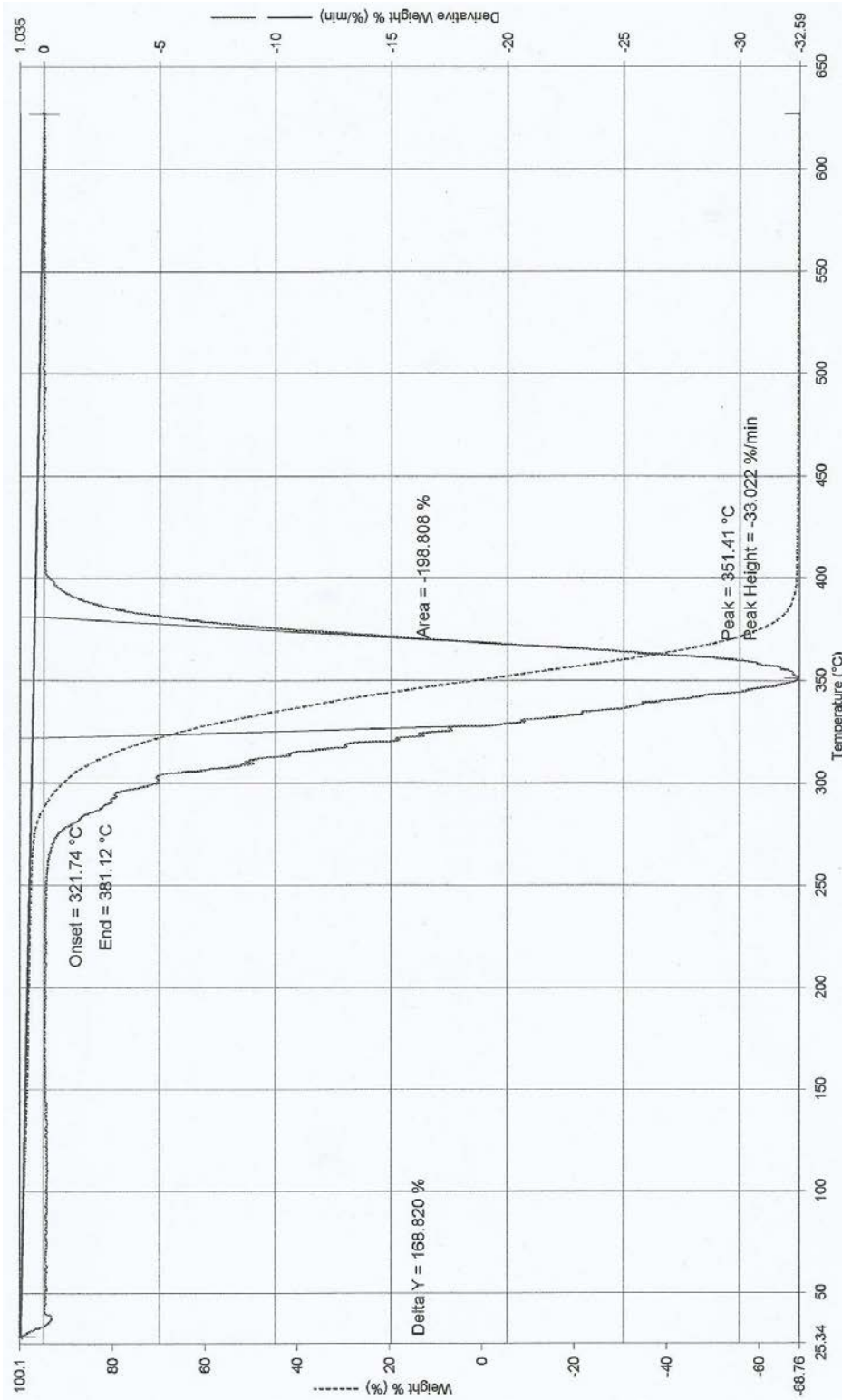
ภาพที่ 70 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกครอบแบตเตอรี่ YAMAHA-Hcover



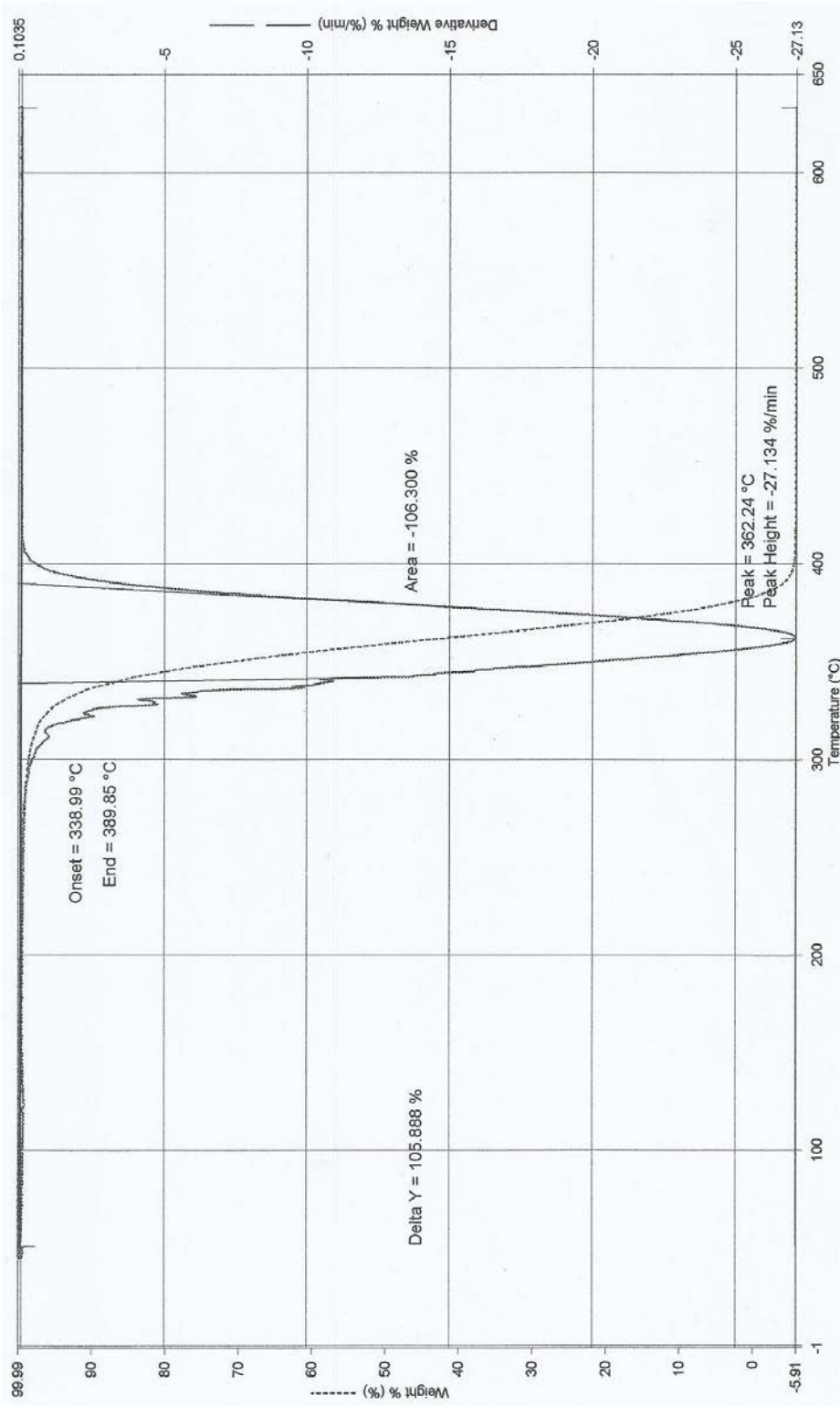
ภาพที่ 71 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกกึ่งผงหน้า YAMAHA -WH



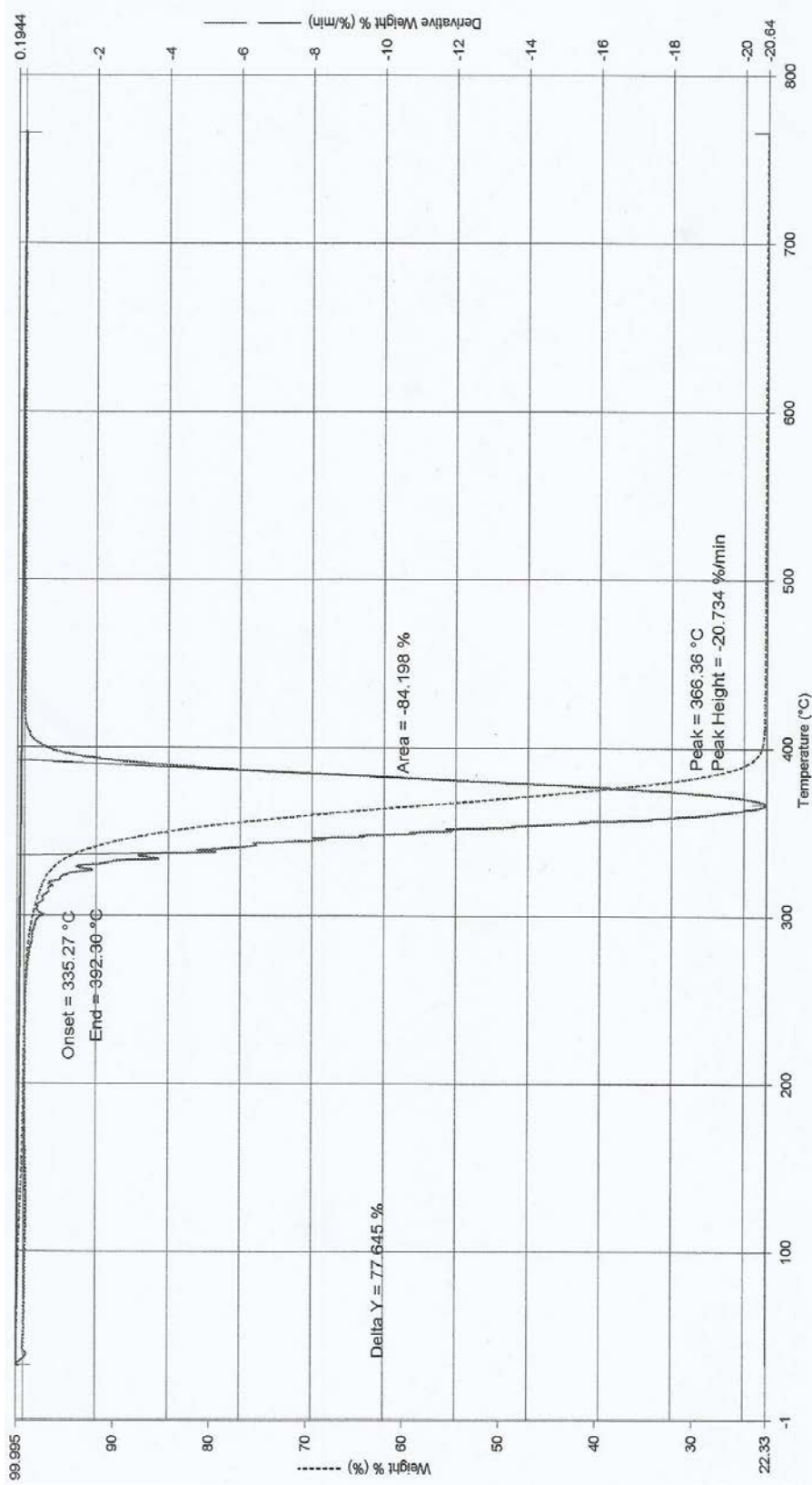
ภาพที่ 72 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกบ่งโคลนหน้า YAMAHA-RH



ภาพที่ 73 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกโคมไฟหน้า YAMAHA-LampH

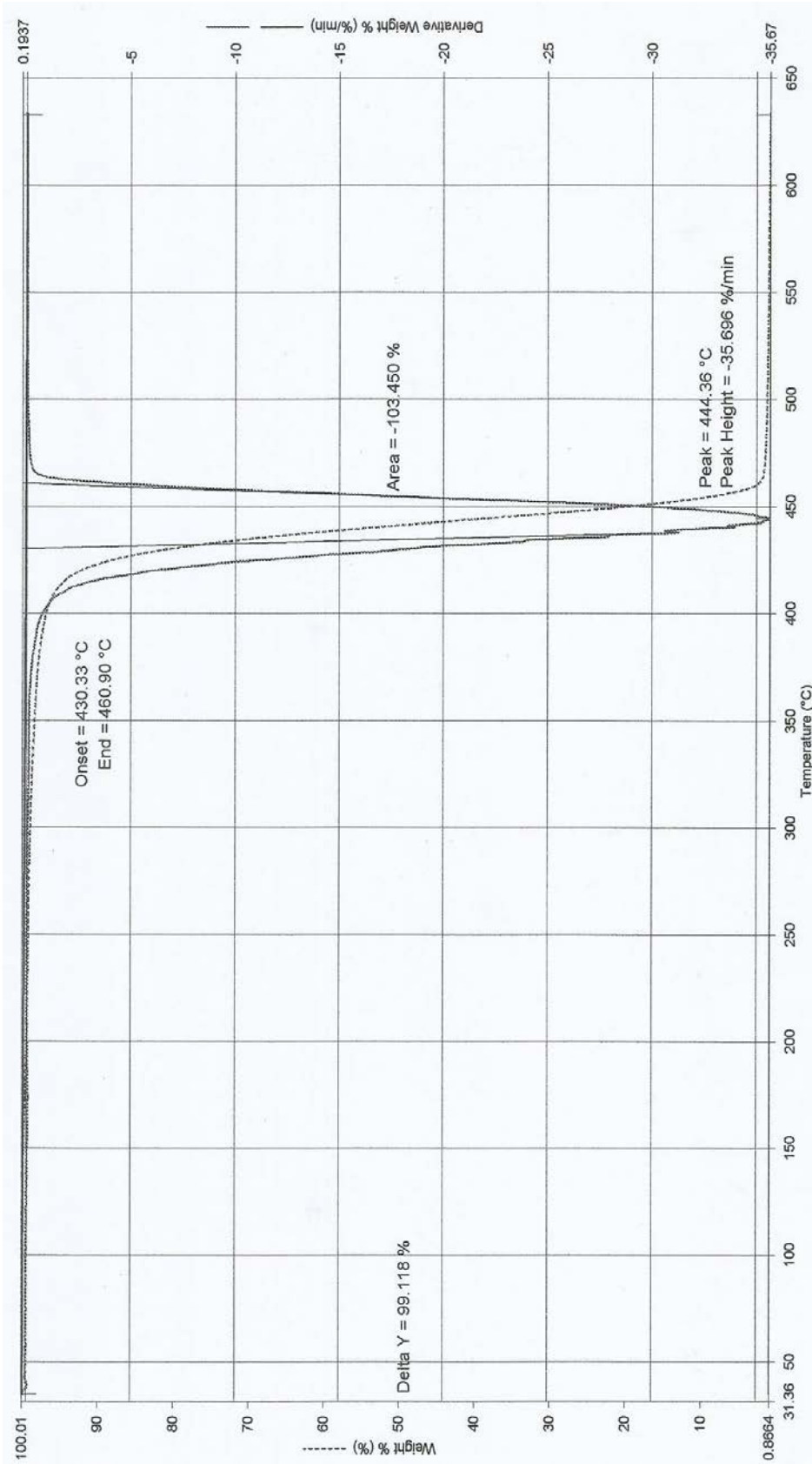


ภาพที่ 74 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกไฟเลียหน้า YAMAHA-LH

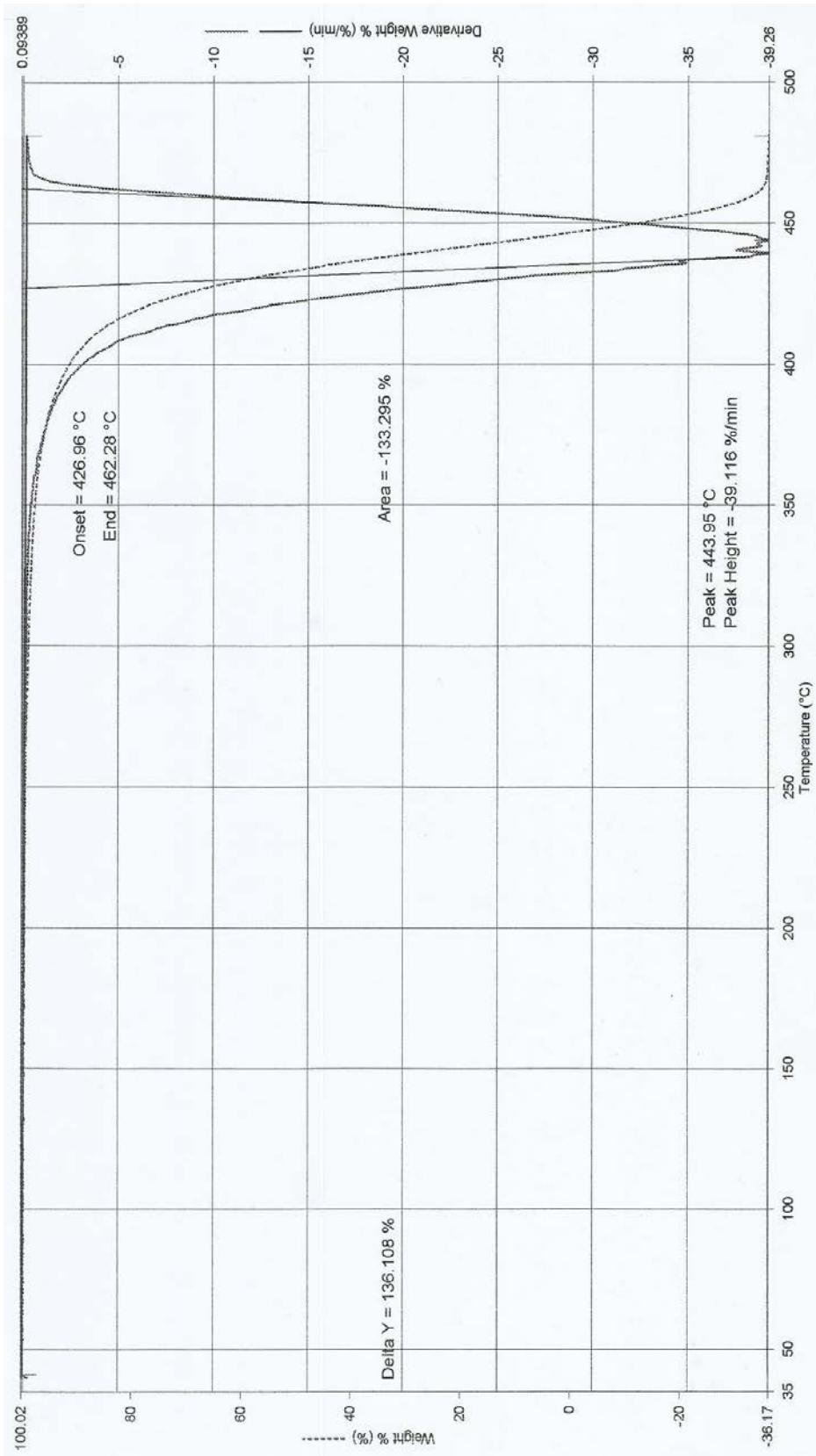


ภาพที่ 75 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติก ฟล็กโซทัง YAMAHA-LT

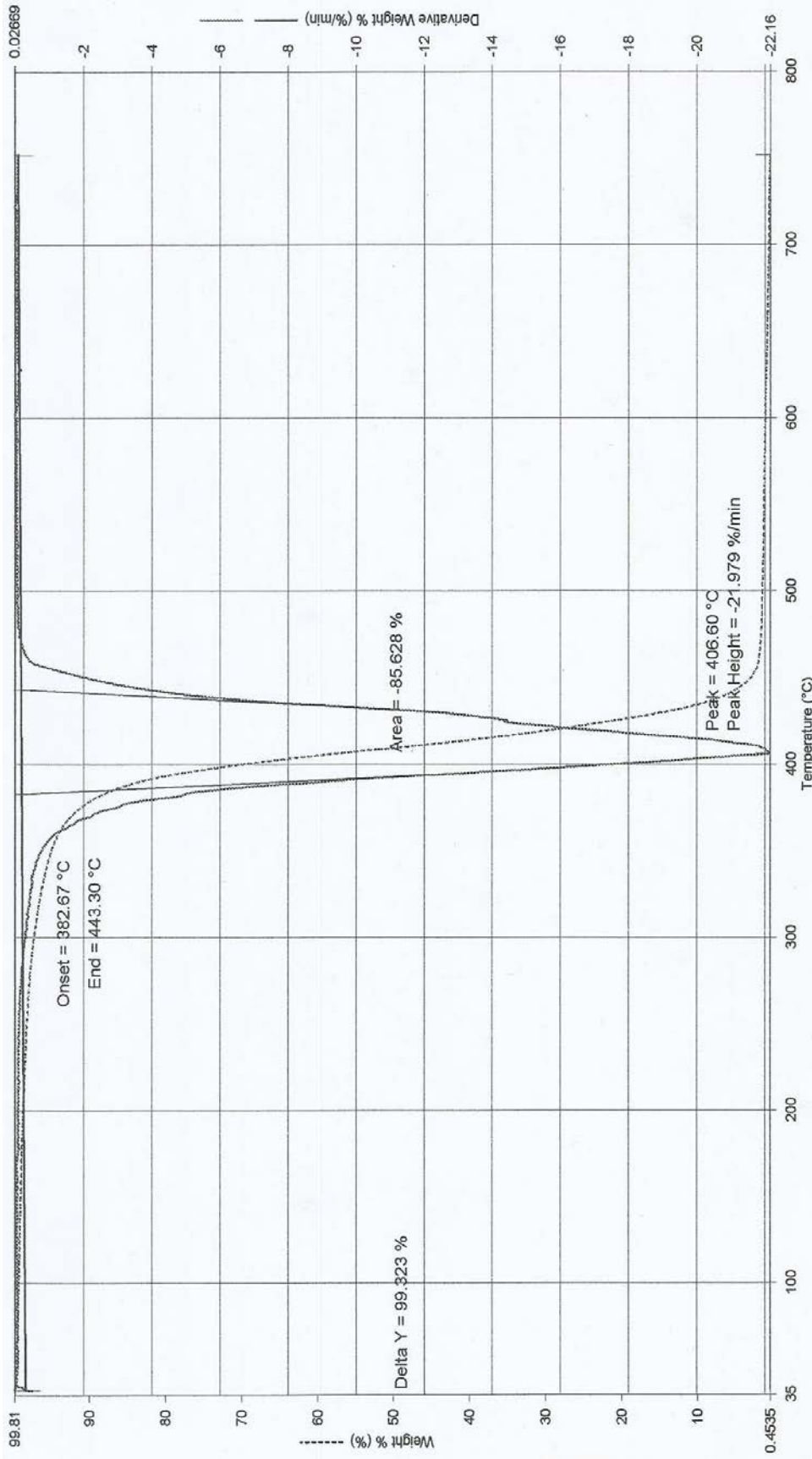




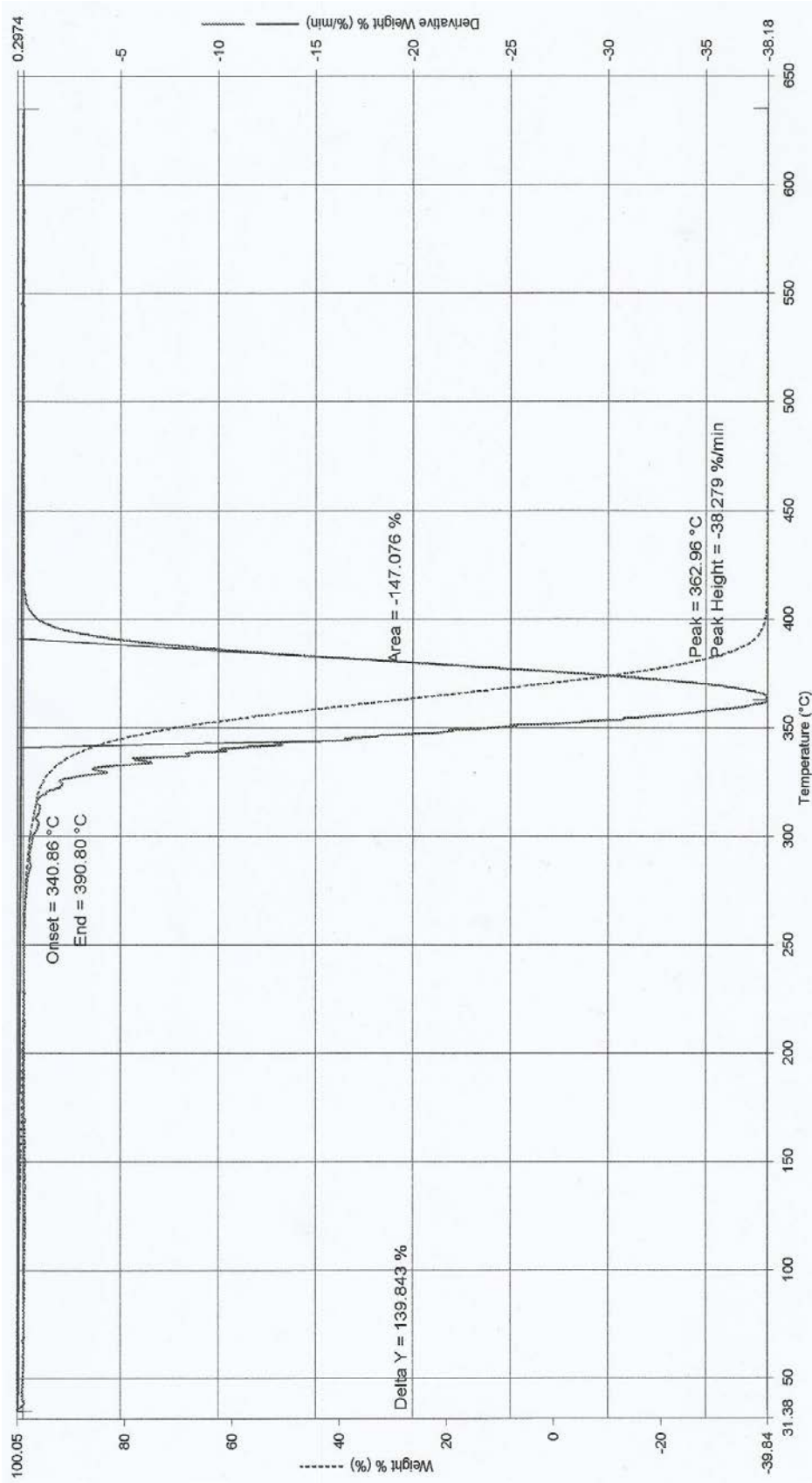
ภาพที่ 76 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกใต้เครื่องยนต์ YAMAHA-Under



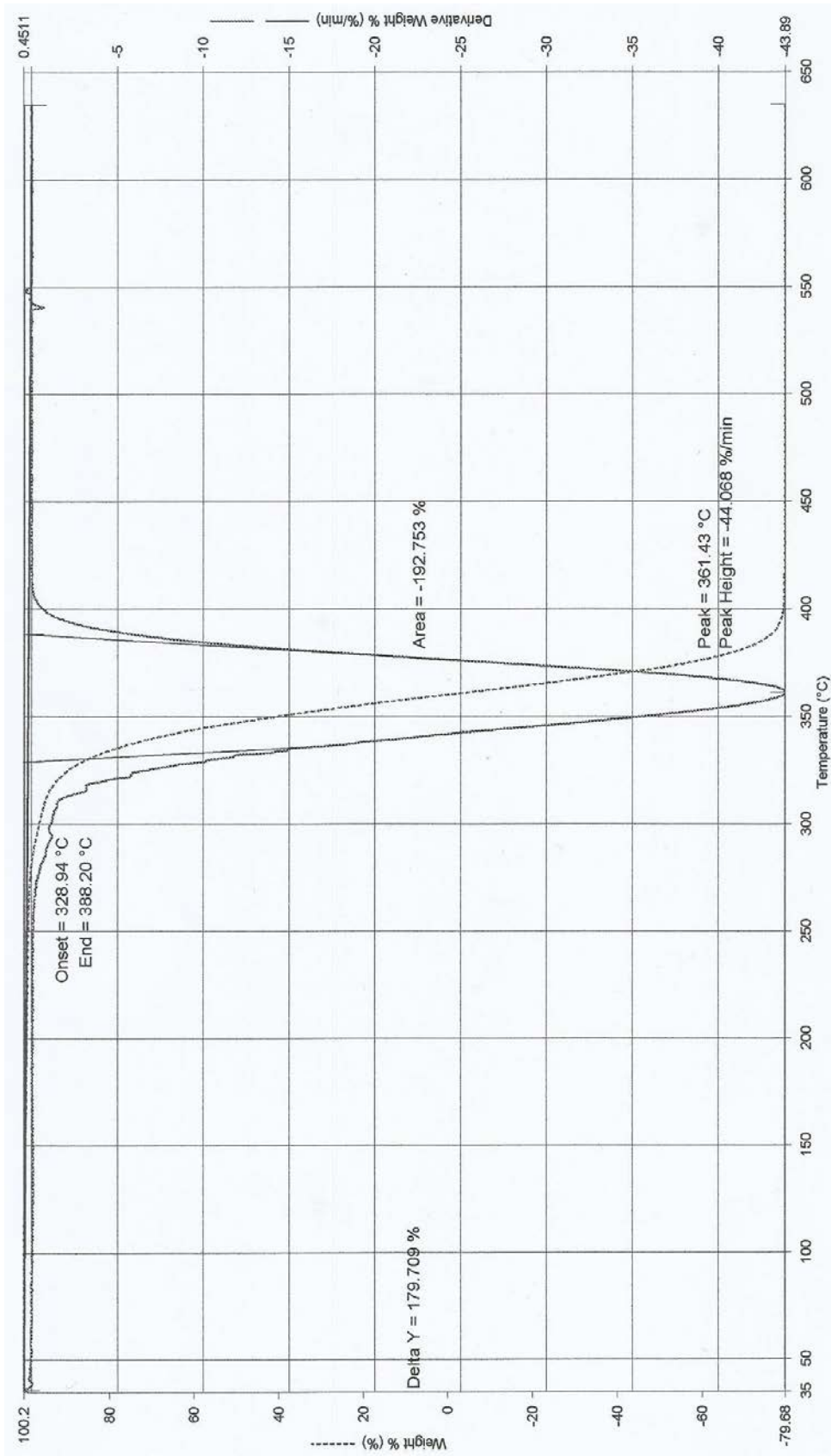
ภาพที่ 77 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกบั้งโคลนหลัง YAMAHA-RT



ภาพที่ 78 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกกรอบตัวถัง YAMAHA-BB



ภาพที่ 79 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกครอบเรือนวัดรอบ YAMAHA-Mcover

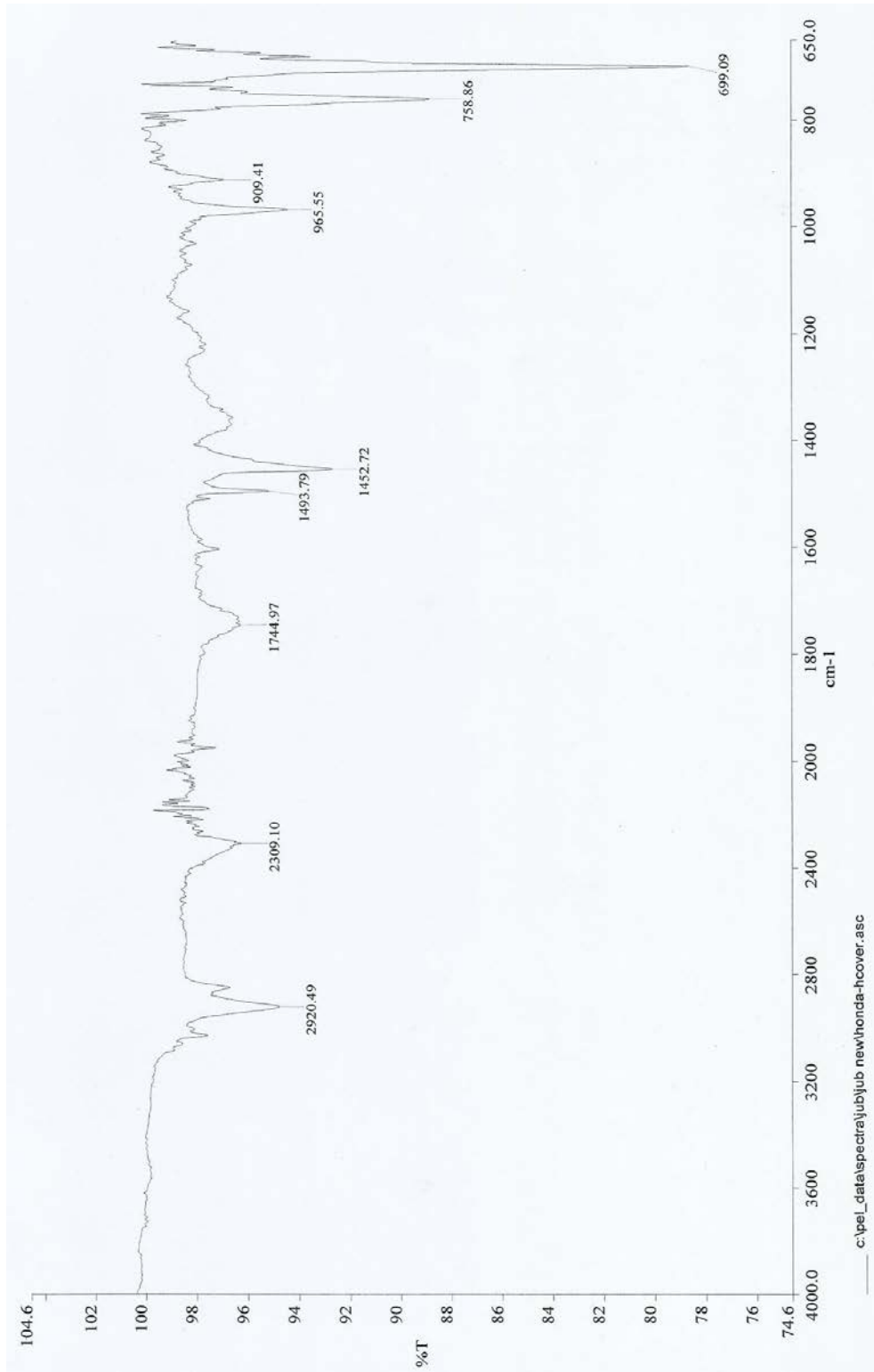


ภาพที่ 80 เทอร์โมแกรม TGA ของพลาสติกโคมไฟหลัง YAMAHA-LampT

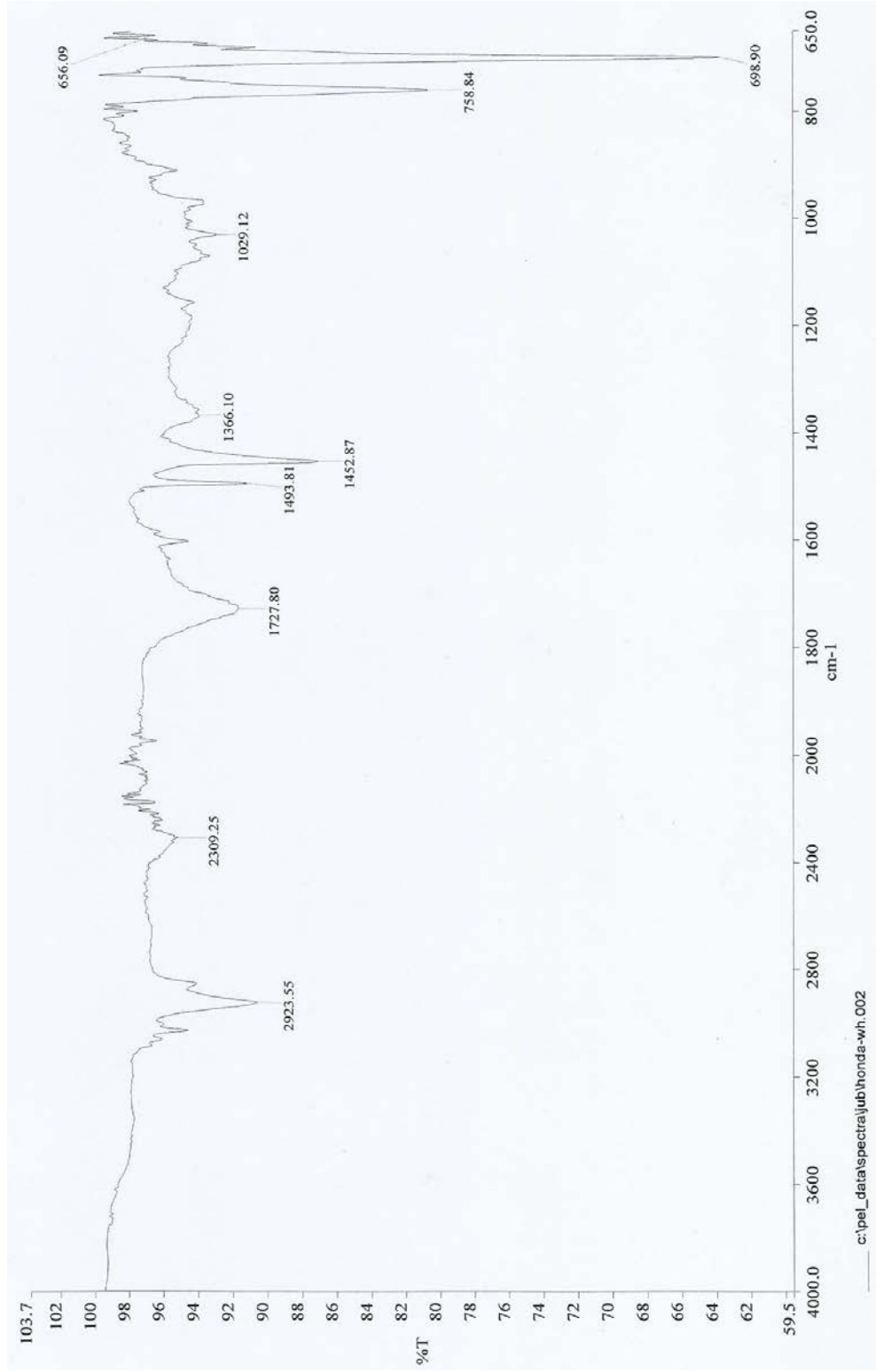


ภาคผนวก ข

สเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค FTIR

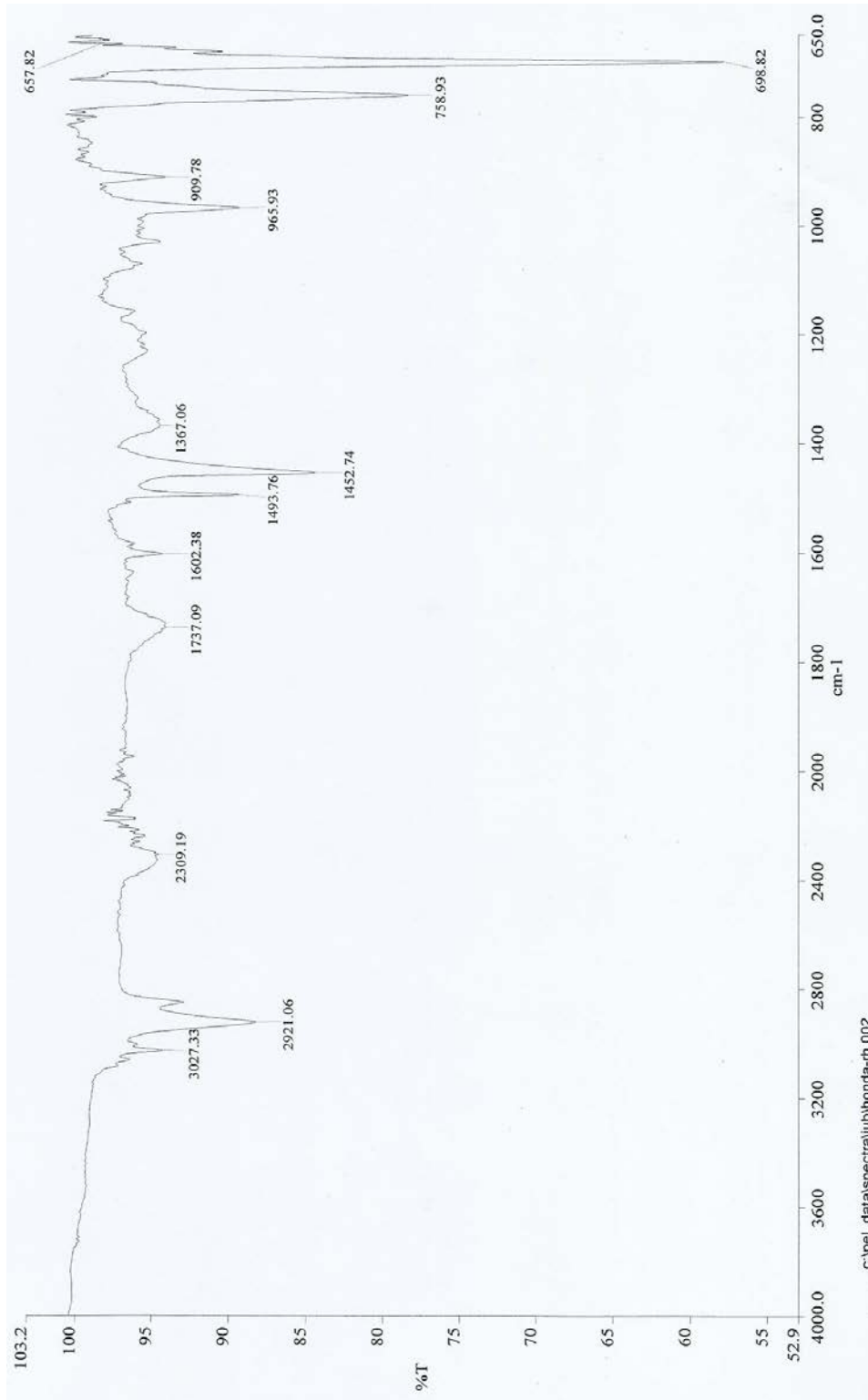


ภาพที่ 81 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกคอมแพค Honda-Hcover

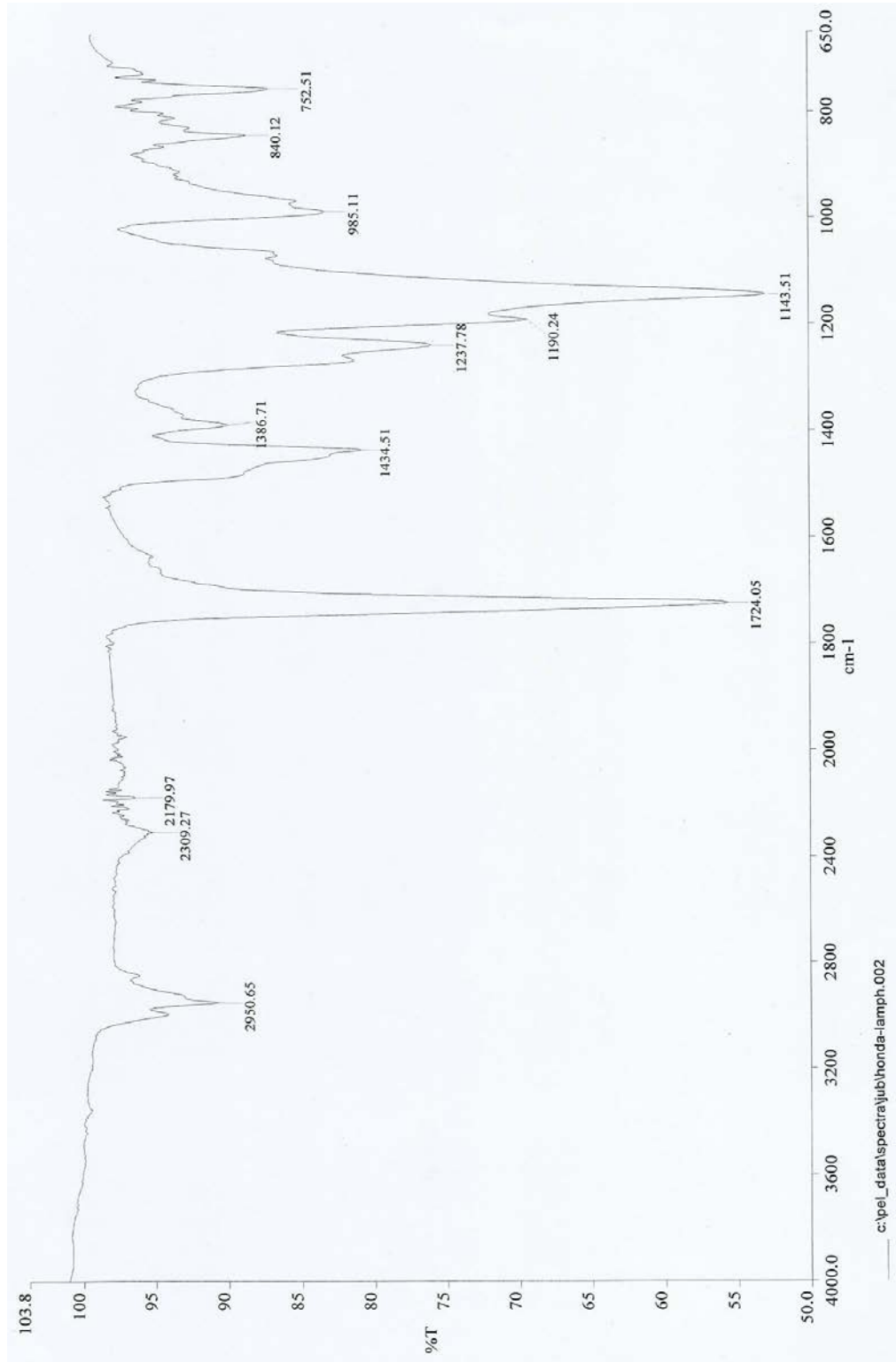


ภาพที่ 82 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกบ่งลมน้ำ HONDA-WH

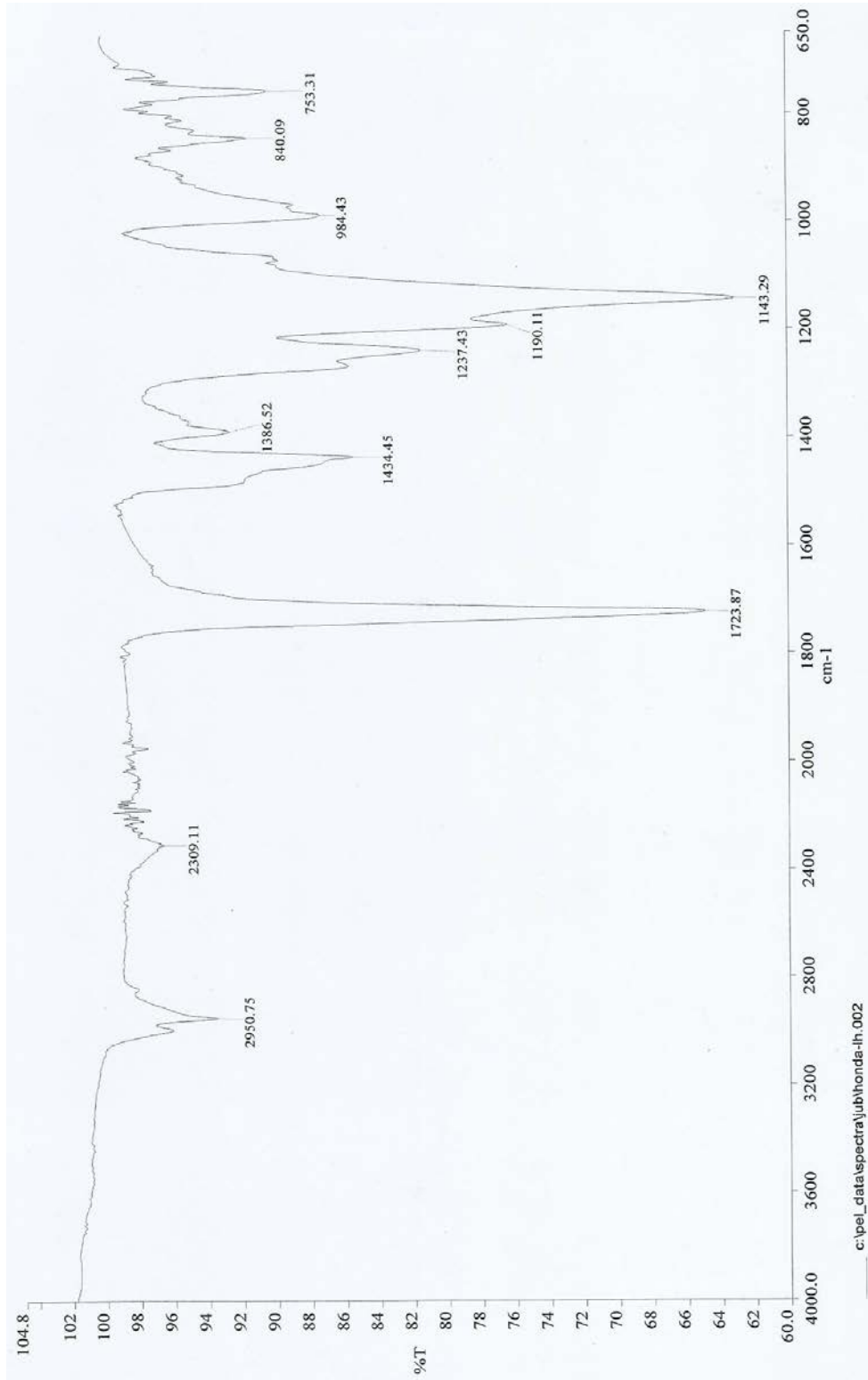




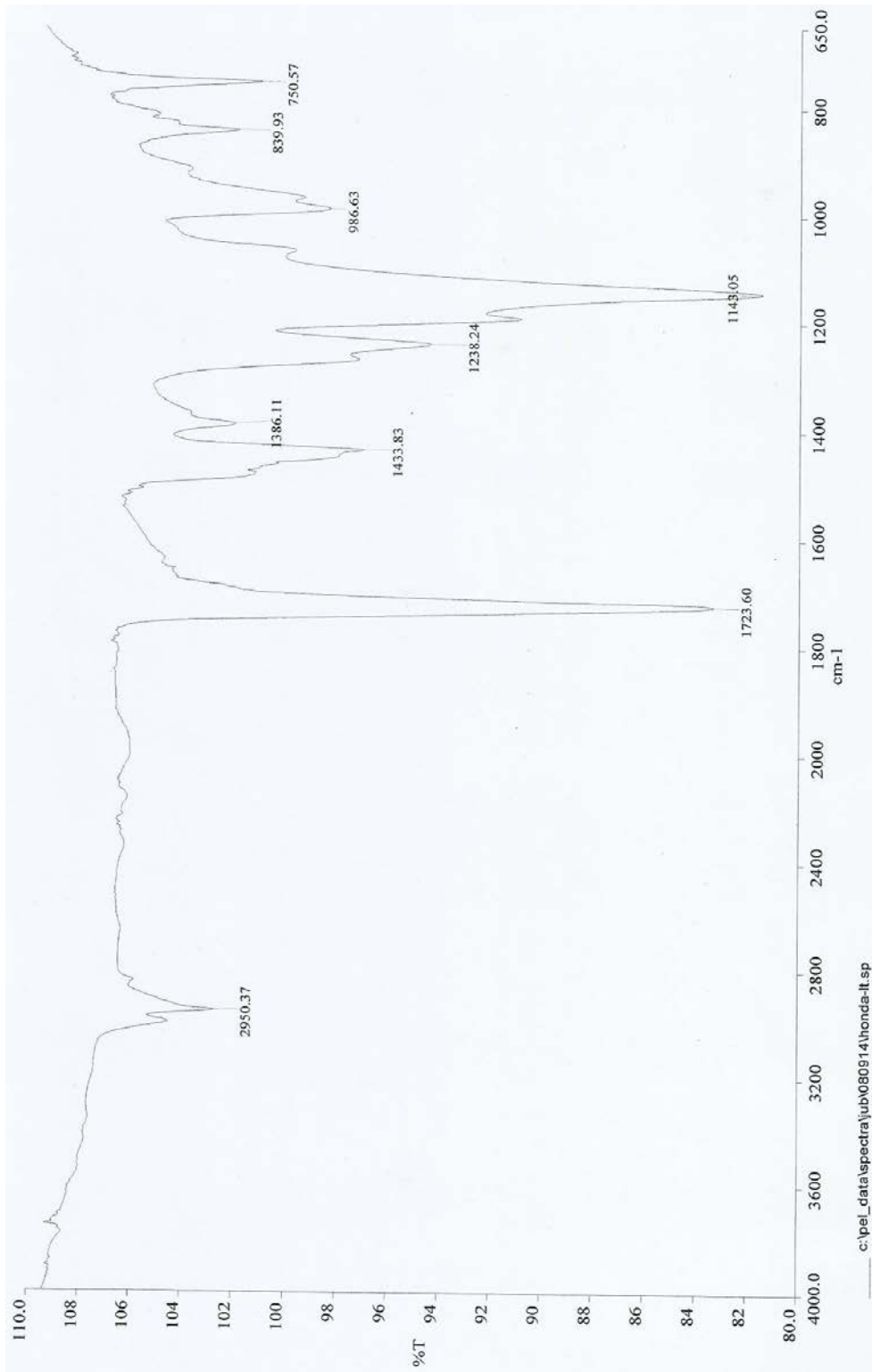
ภาพที่ 83 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกบั้งโคลนหน้า HONDA-RH



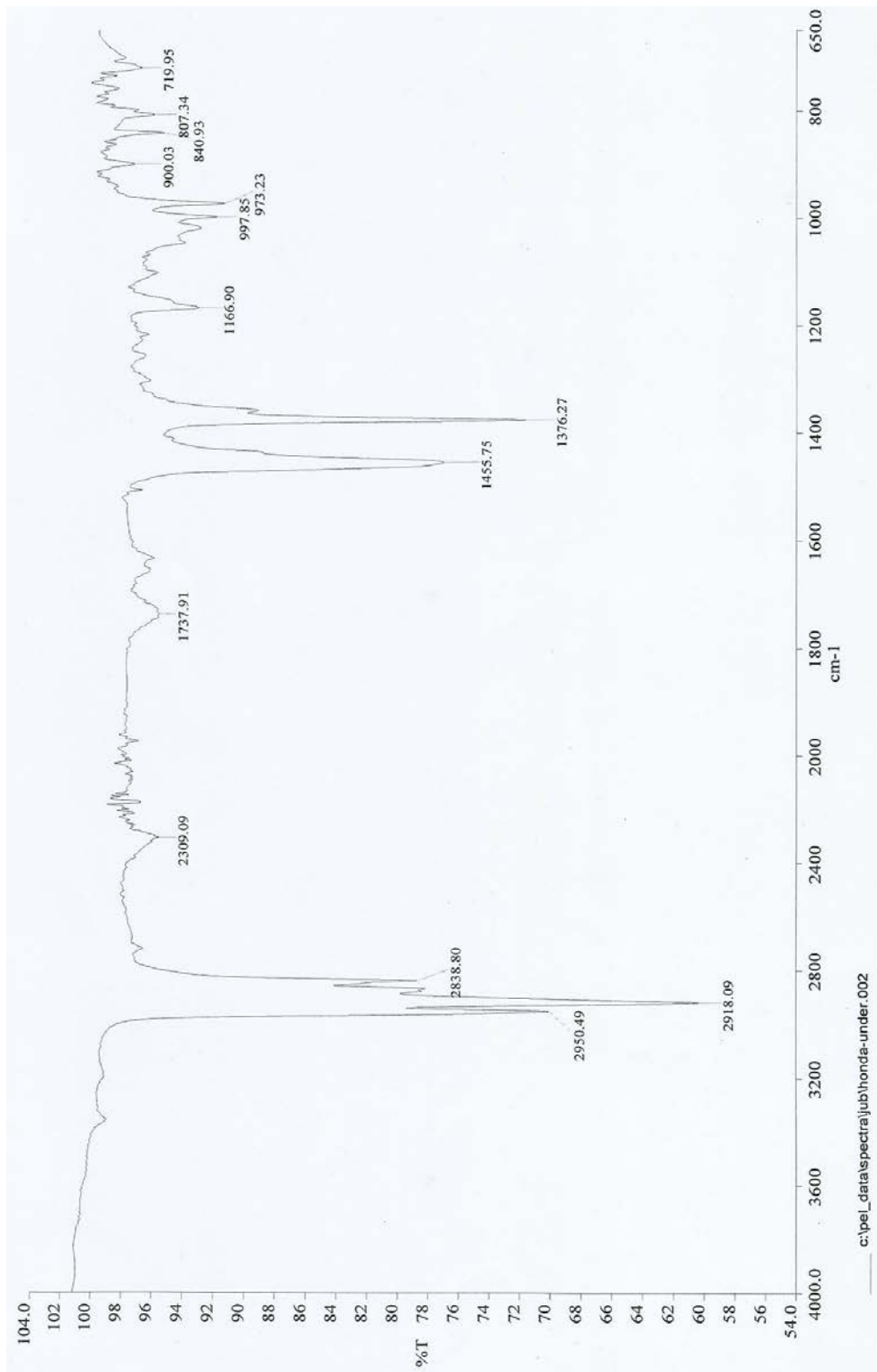
ภาพที่ 84 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกโคมไฟหน้า HONDA-LampH



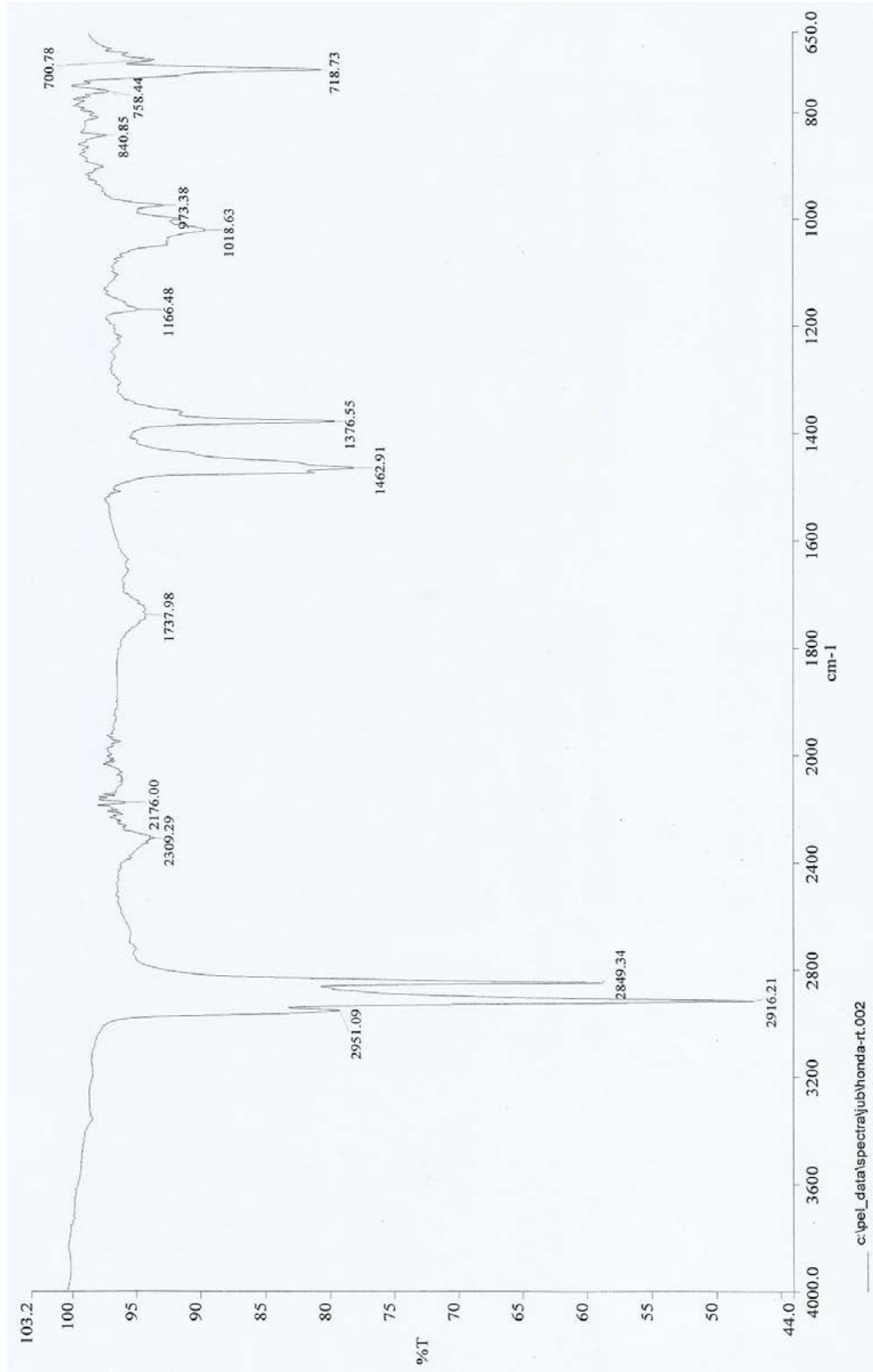
ภาพที่ 85 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกเชื้อเพลิง Honda-LH



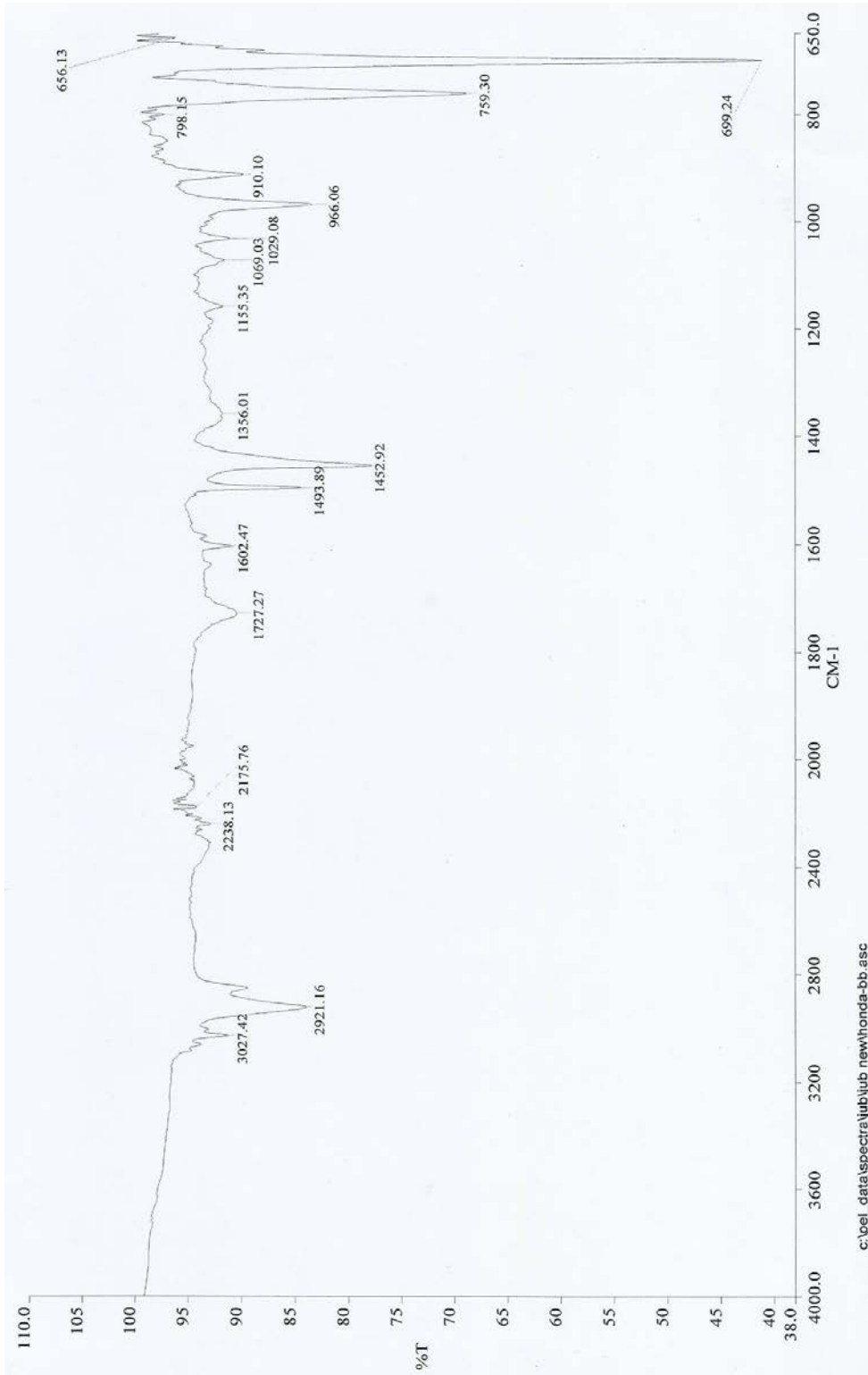
ภาพที่ 86 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกไฟฟ้เลียหลัง HONDA-LT



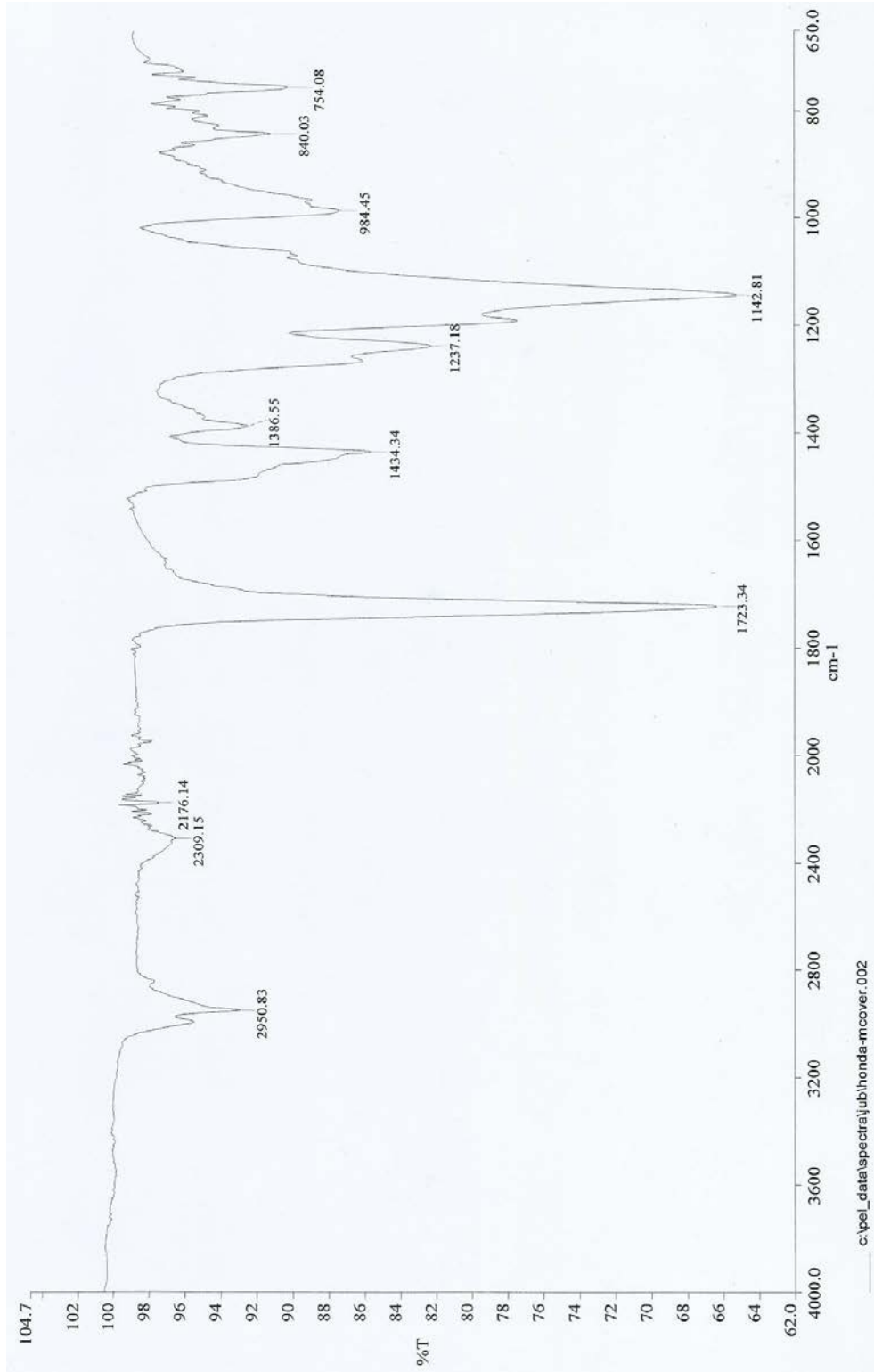
ภาพที่ 87 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกใต้เครื่องยนต์ HONDA-Under



ภาพที่ 88 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกบั้ง โคคนหลัง HONDA-RT

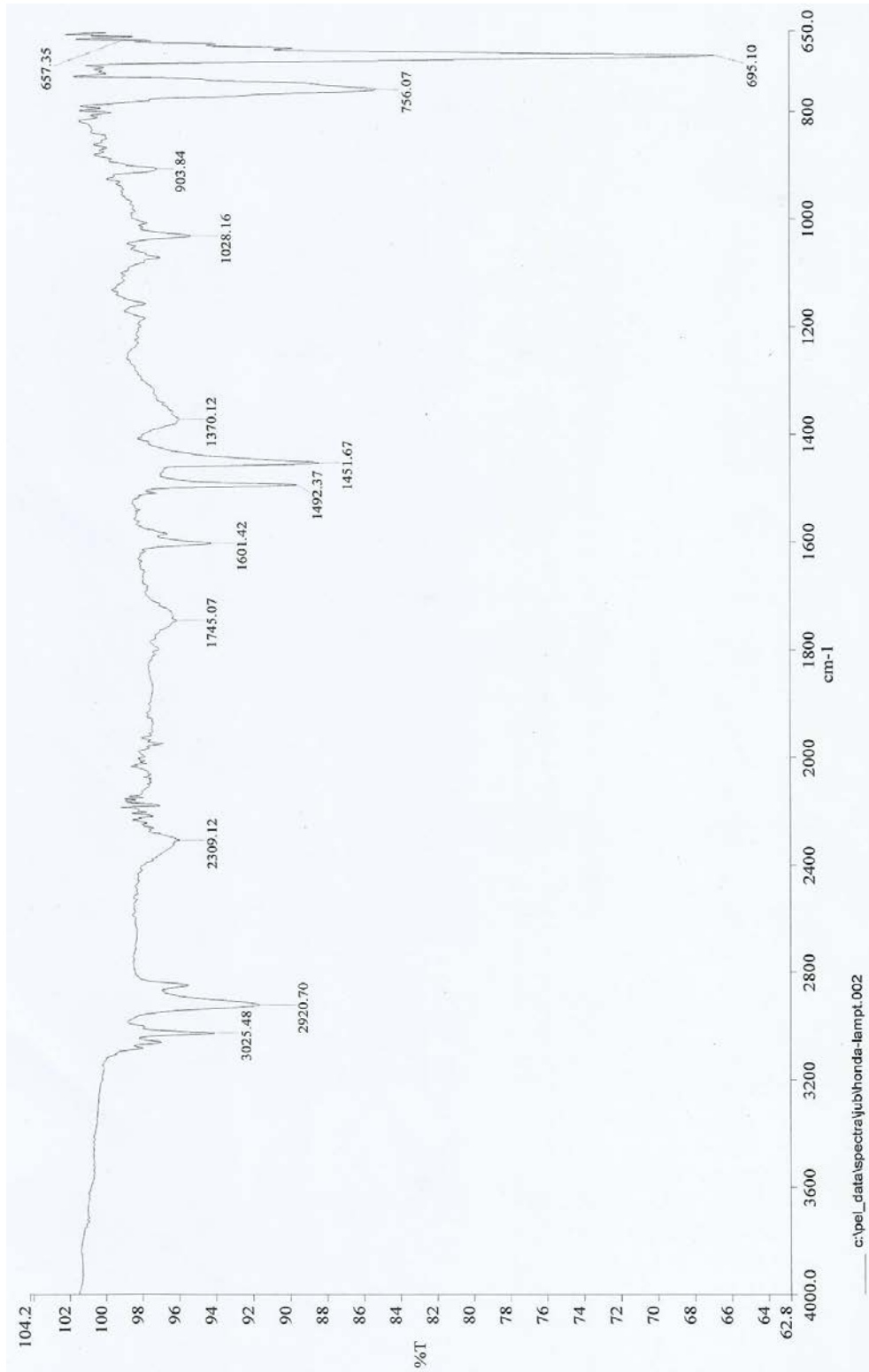


ภาพที่ 89 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกที่ครอบตัวถัง HONDA-BB

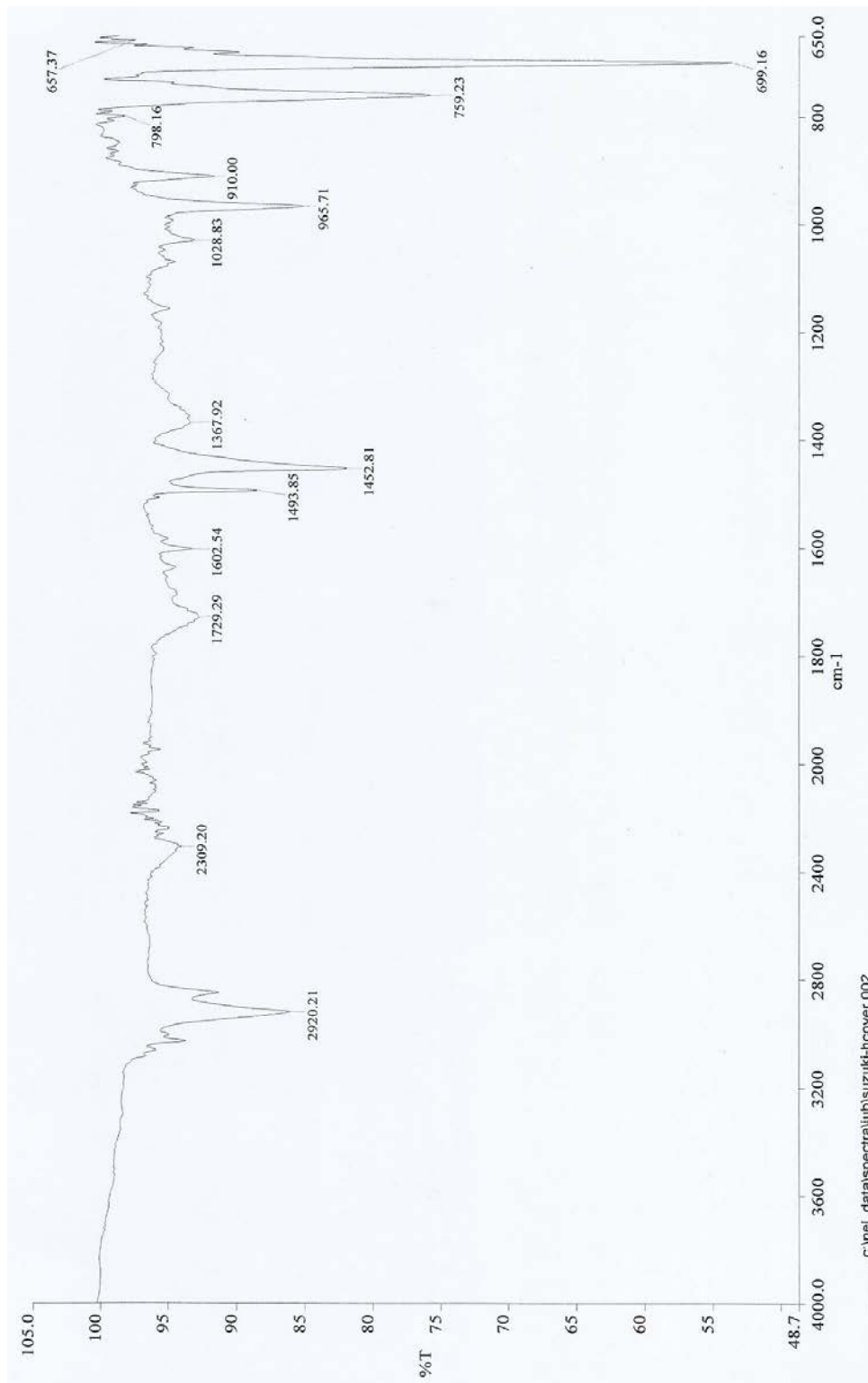


ภาพที่ 90 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกครอบเรือนจักรยาน HONDA-Mcover

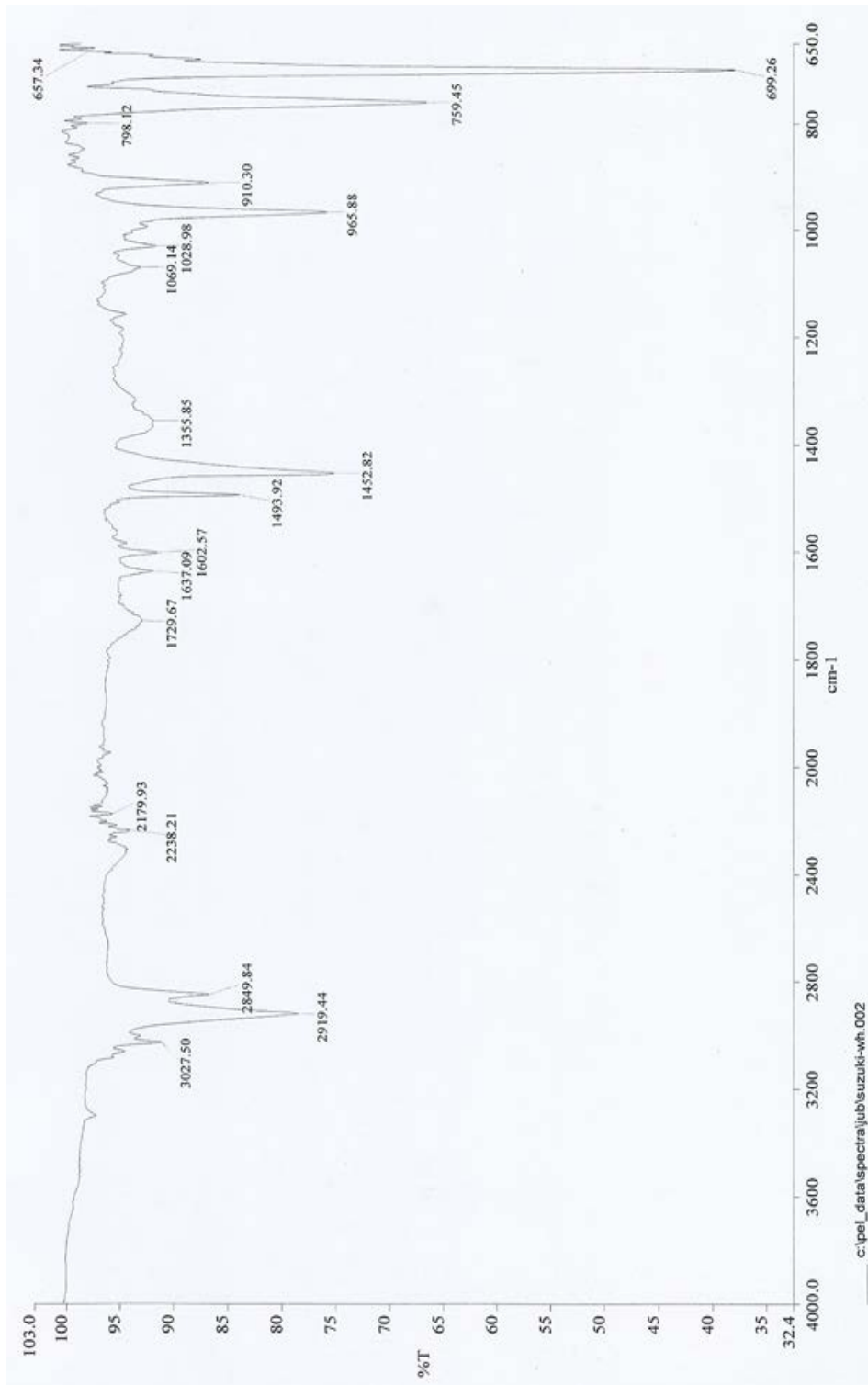




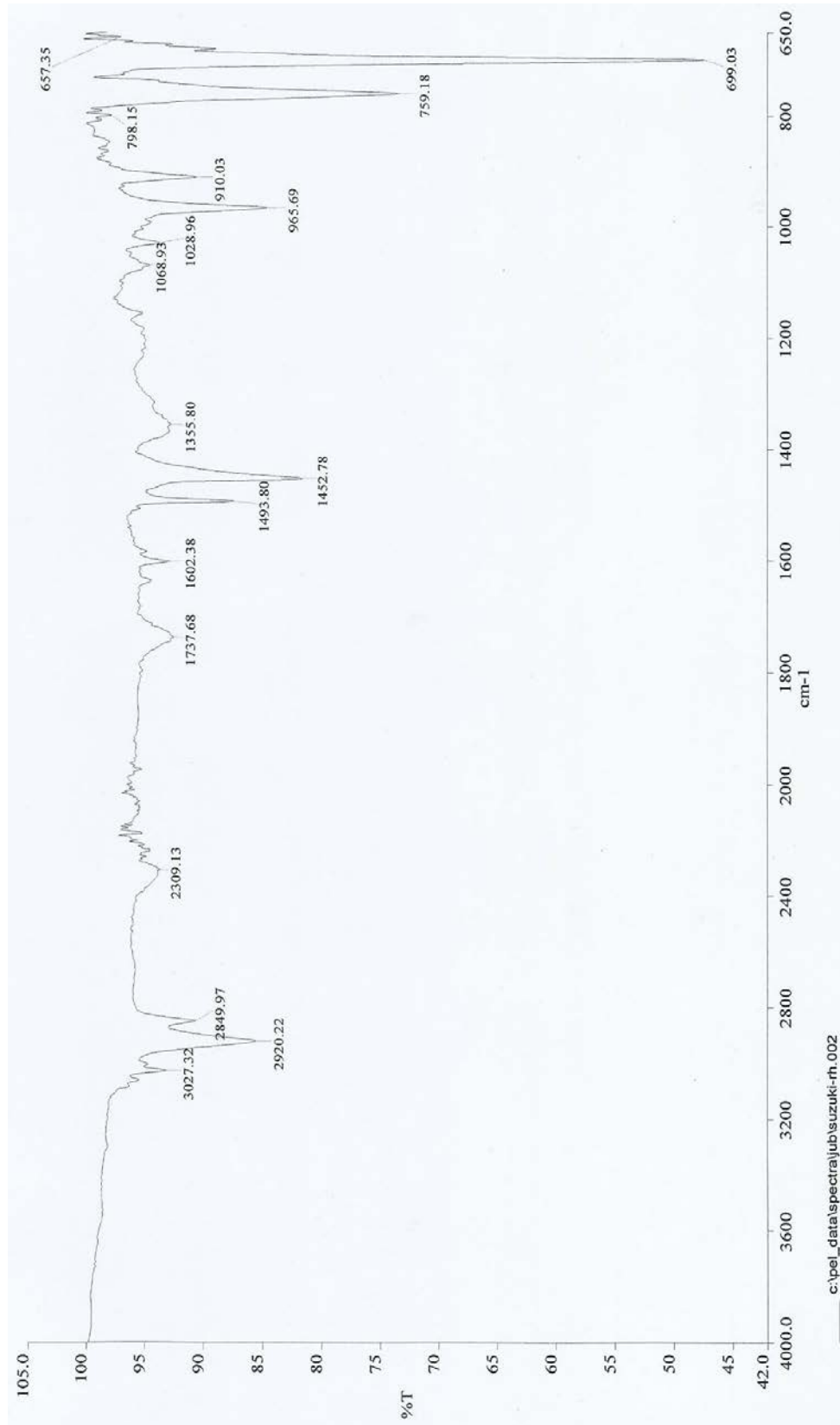
ภาพที่ 91 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกโคมไฟหลัง HONDA-LampT



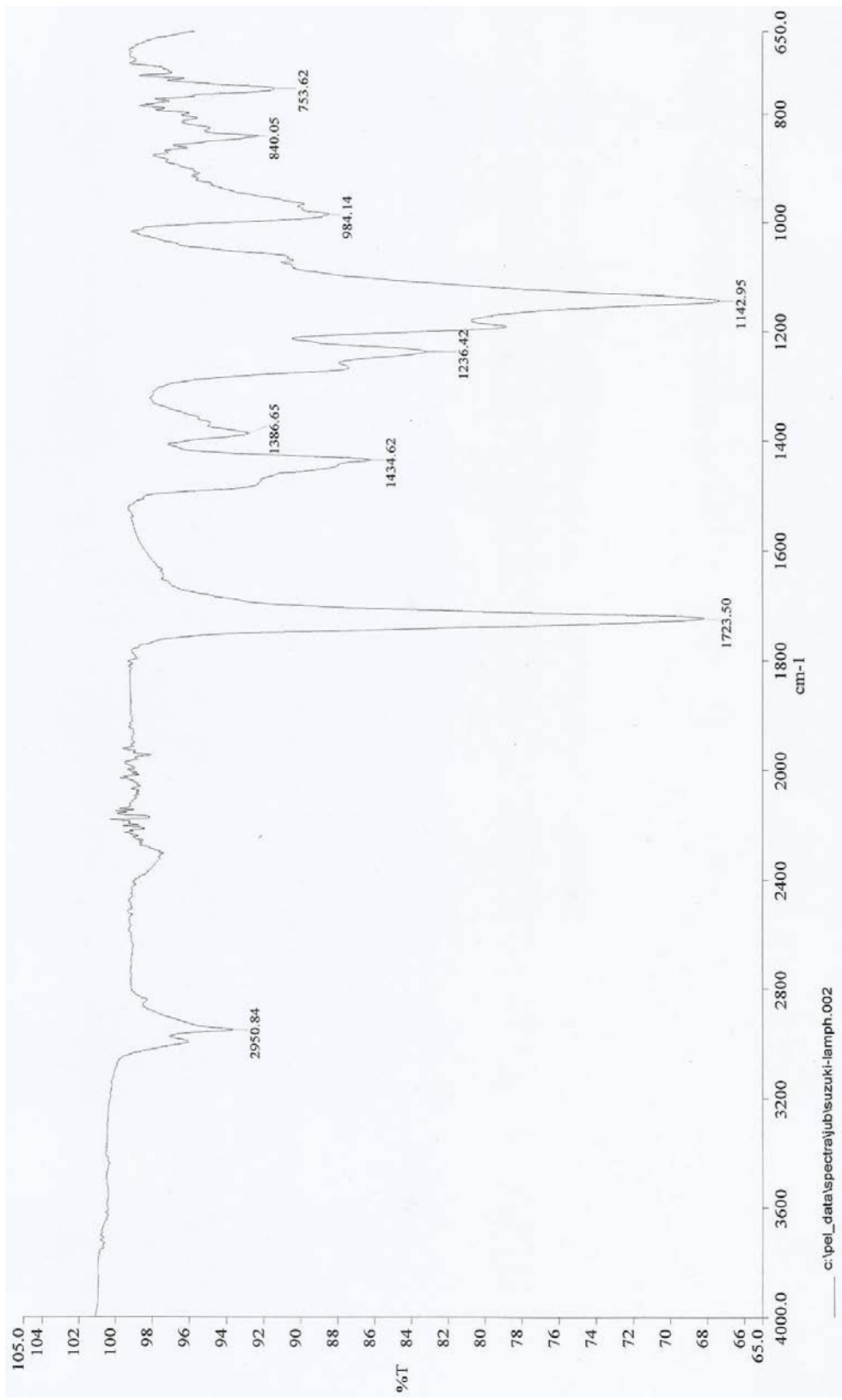
ภาพที่ 92 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกกรอบแคร์ SUZUKI-Hcover



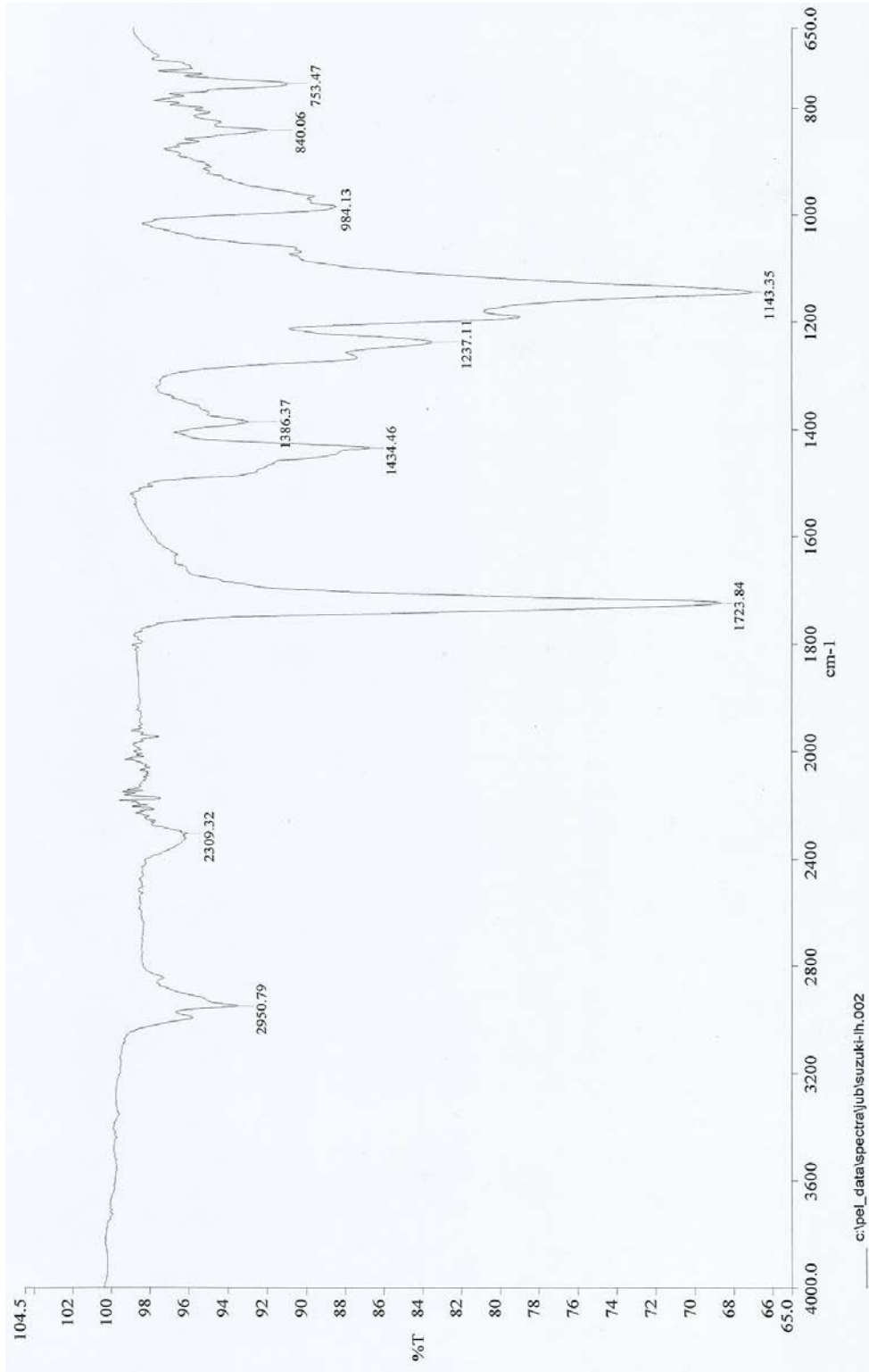
ภาพที่ 93 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกบั้งลมหน้า SUZUKI -WH



ภาพที่ 94 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกบ่งโคลนหน้า SUZUKI-RH

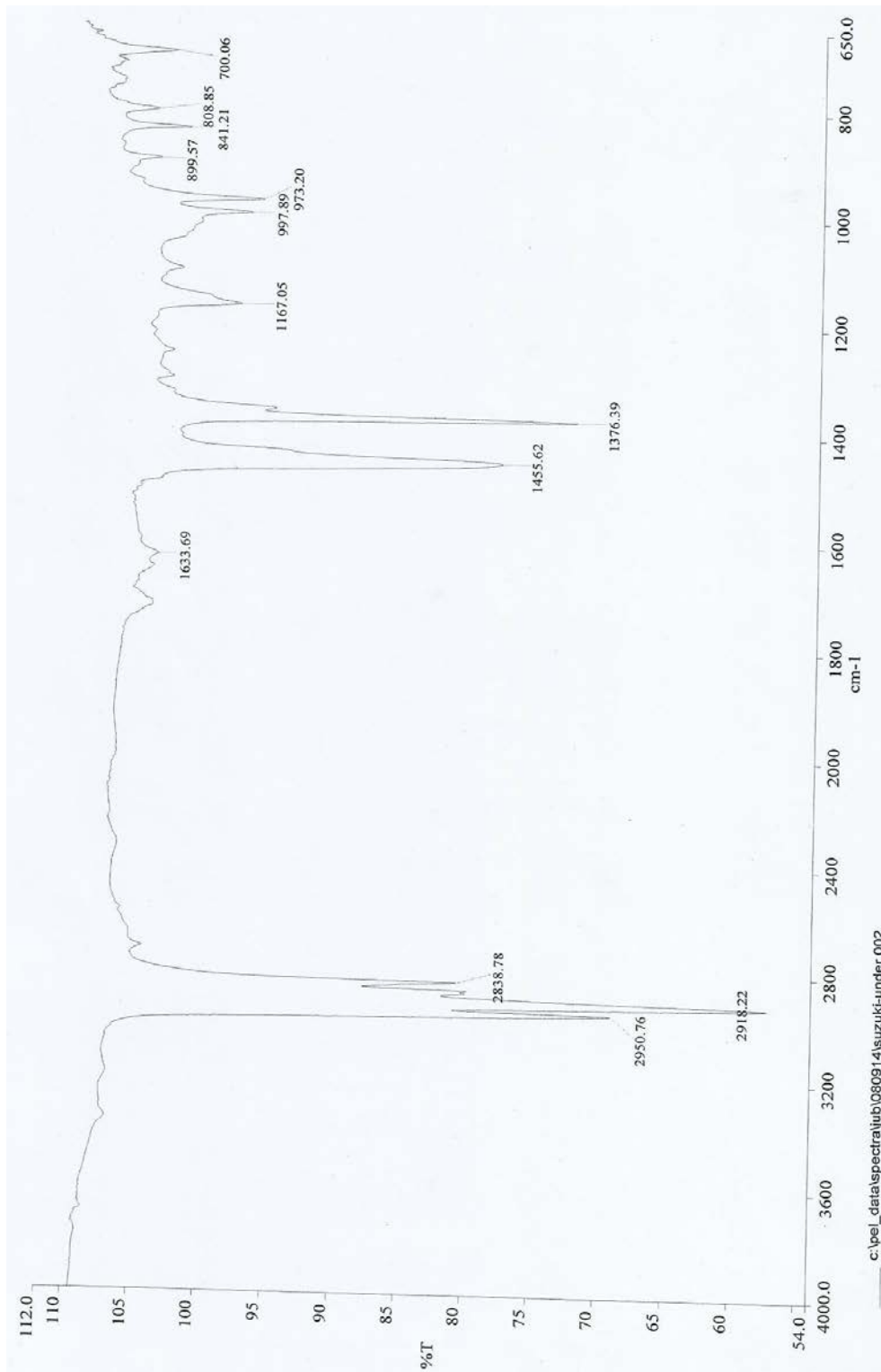


ภาพที่ 95 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติก โคมไฟหน้า SUZUKI-LampH

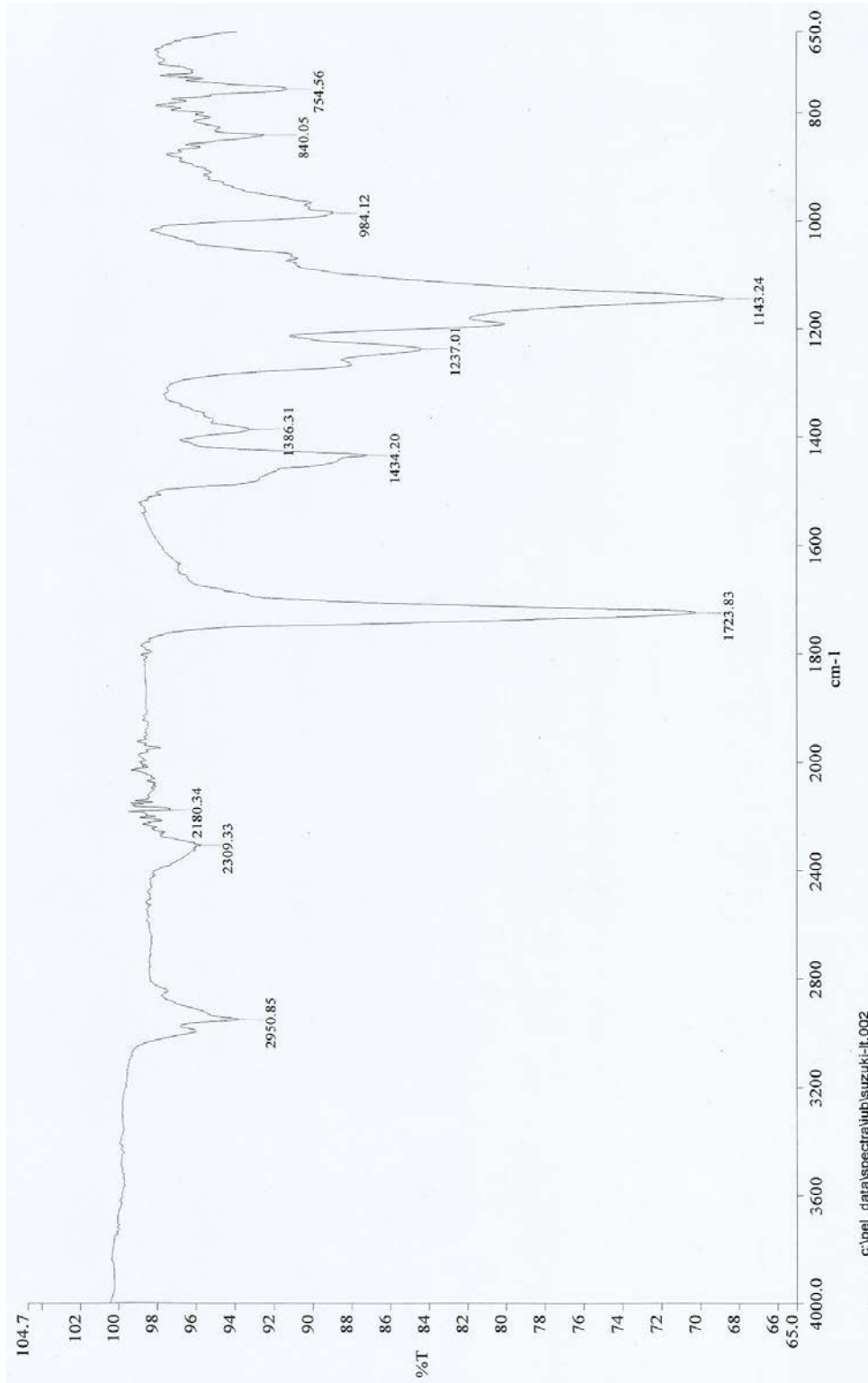


c:\pel\_data\spectra\jub\suzuki-lh.002

ภาพที่ 96 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกโพลีเอทิลีน SUZUKI-LH

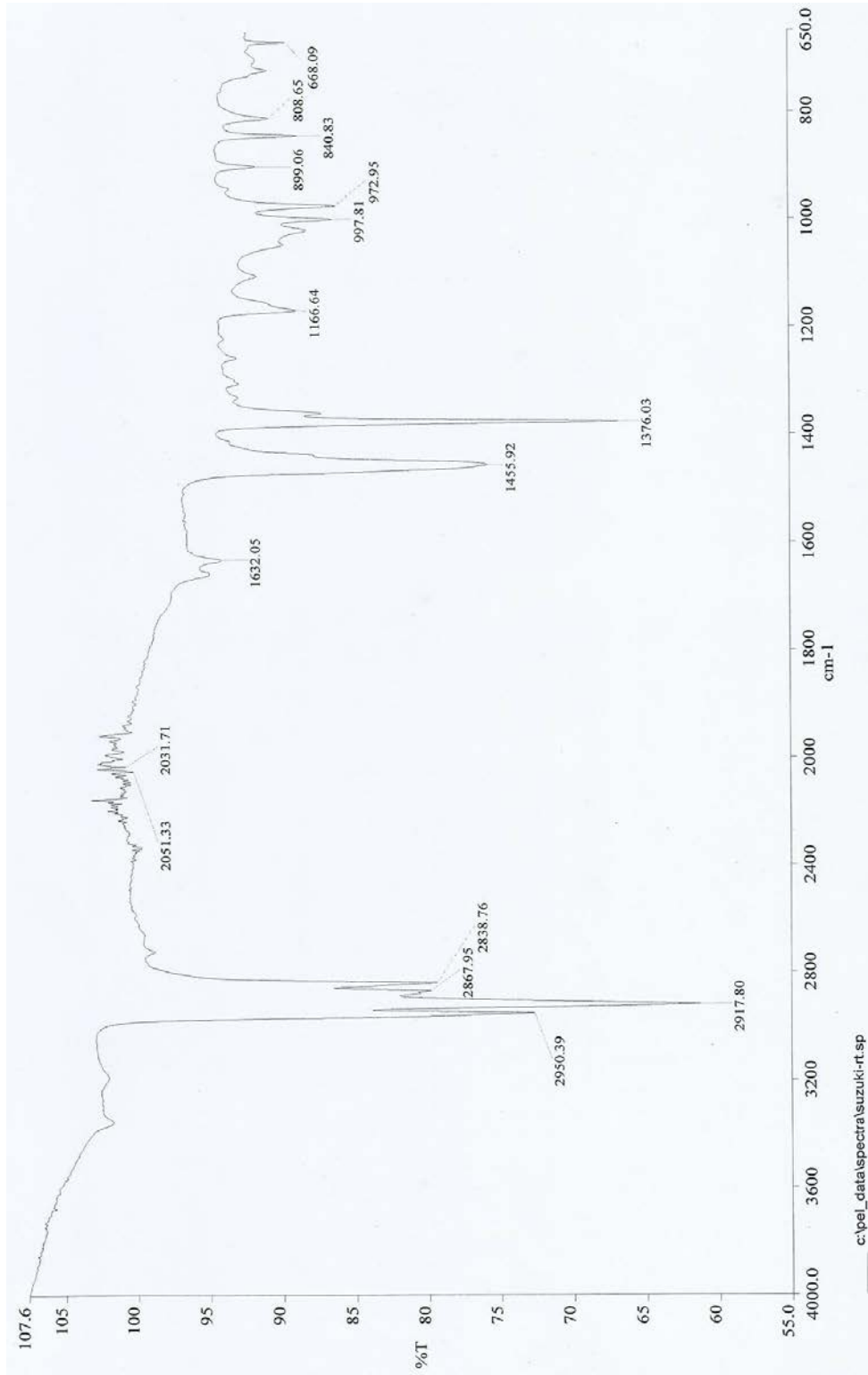


ภาพที่ 97 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกใต้เครื่องยนต์ SUZUKI-Under

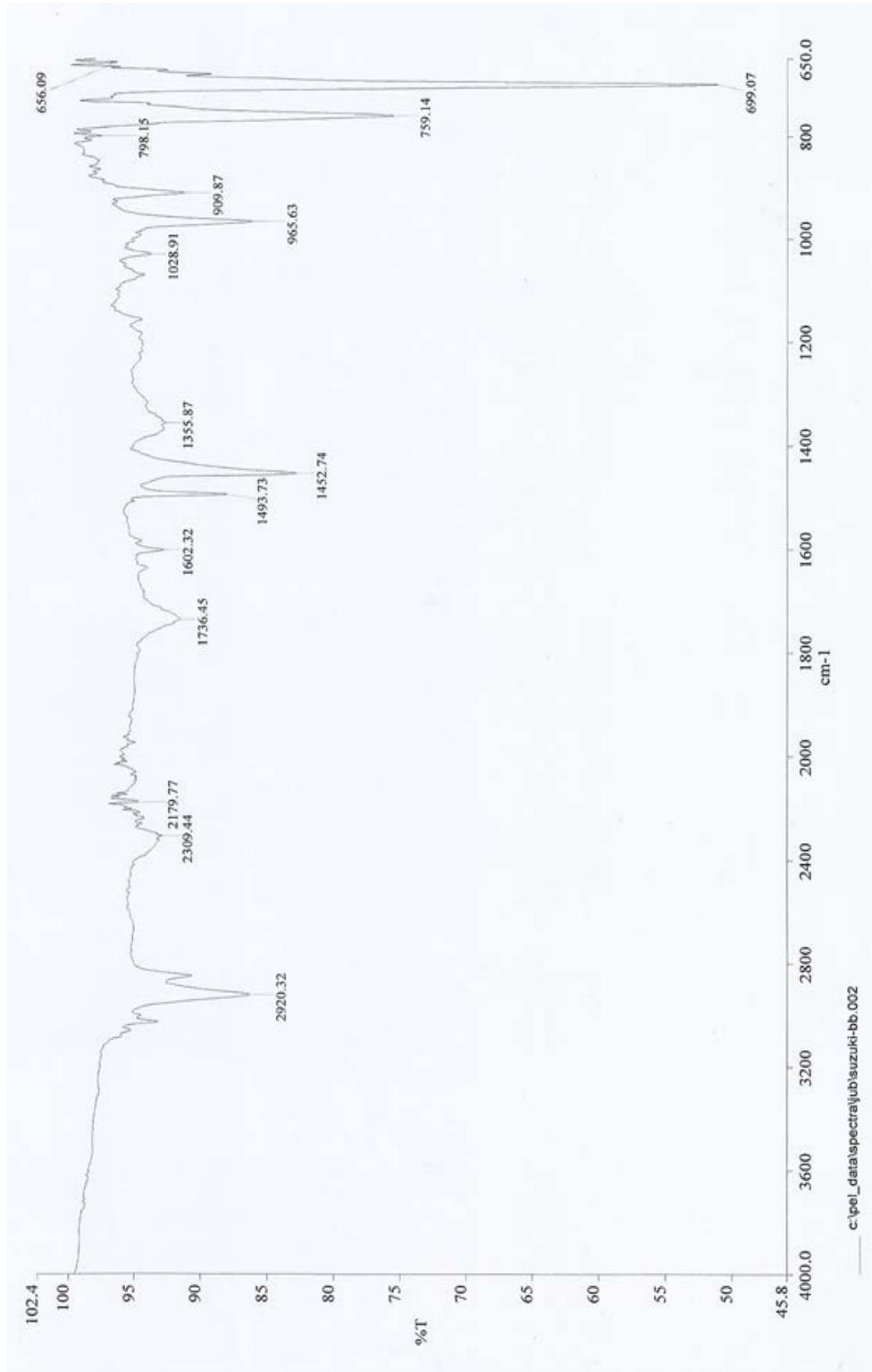


ภาพที่ 98 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกไฟเลียหลัง SUZUKI-LT

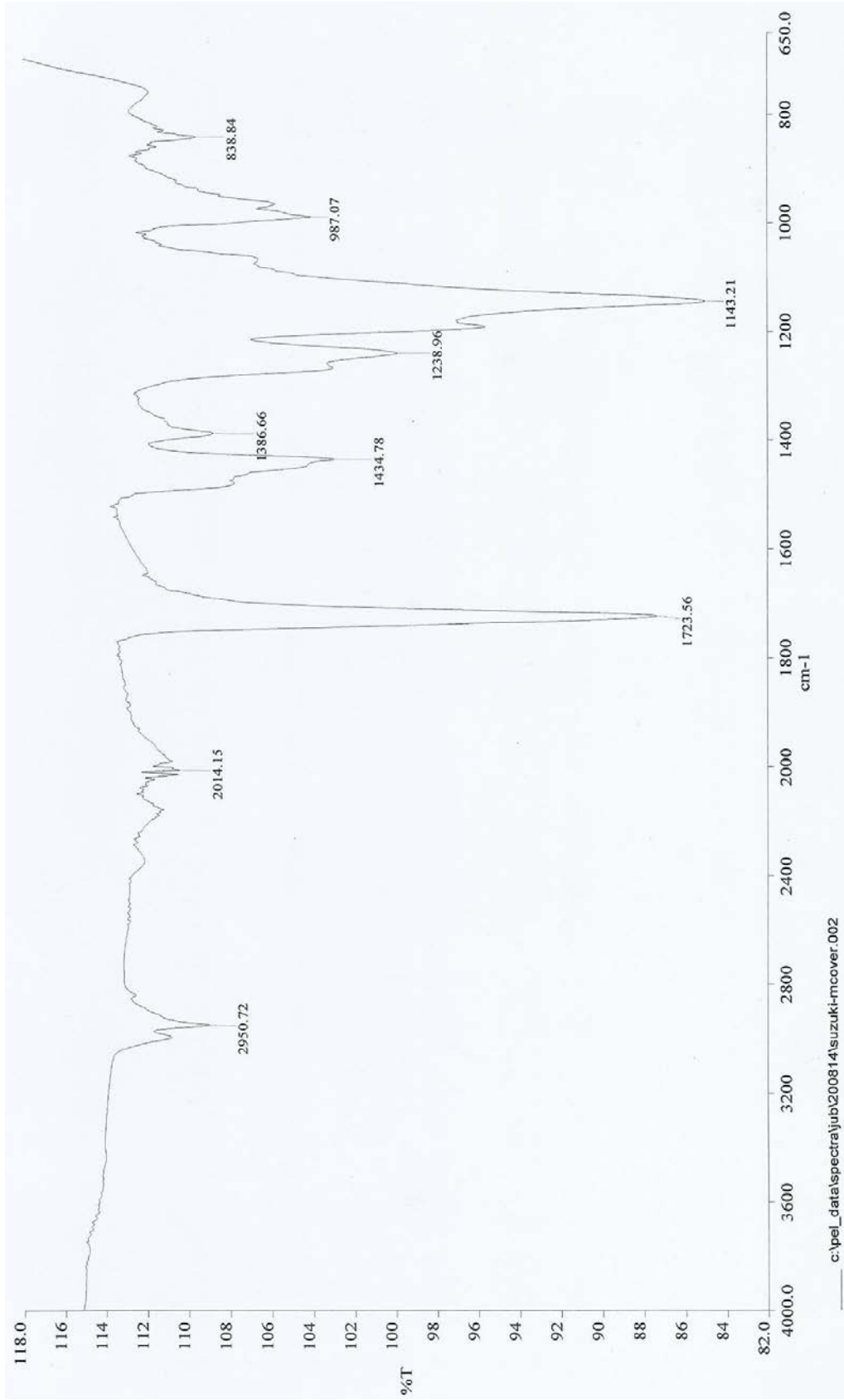




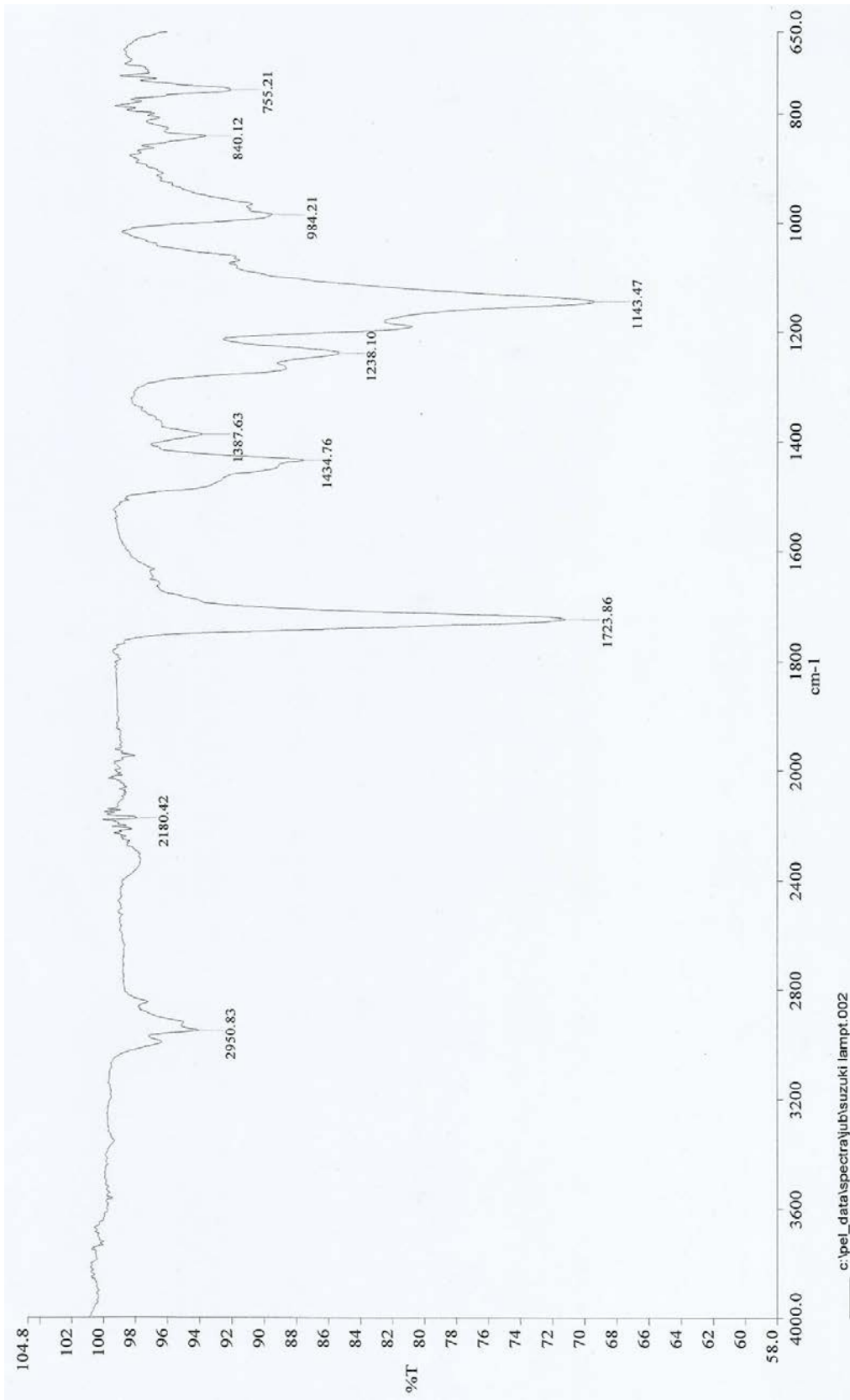
ภาพที่ 99 สเปกตรัม FTIR ของพลาตินิกัมโคบอลต์หลัง SUZUKI-RT



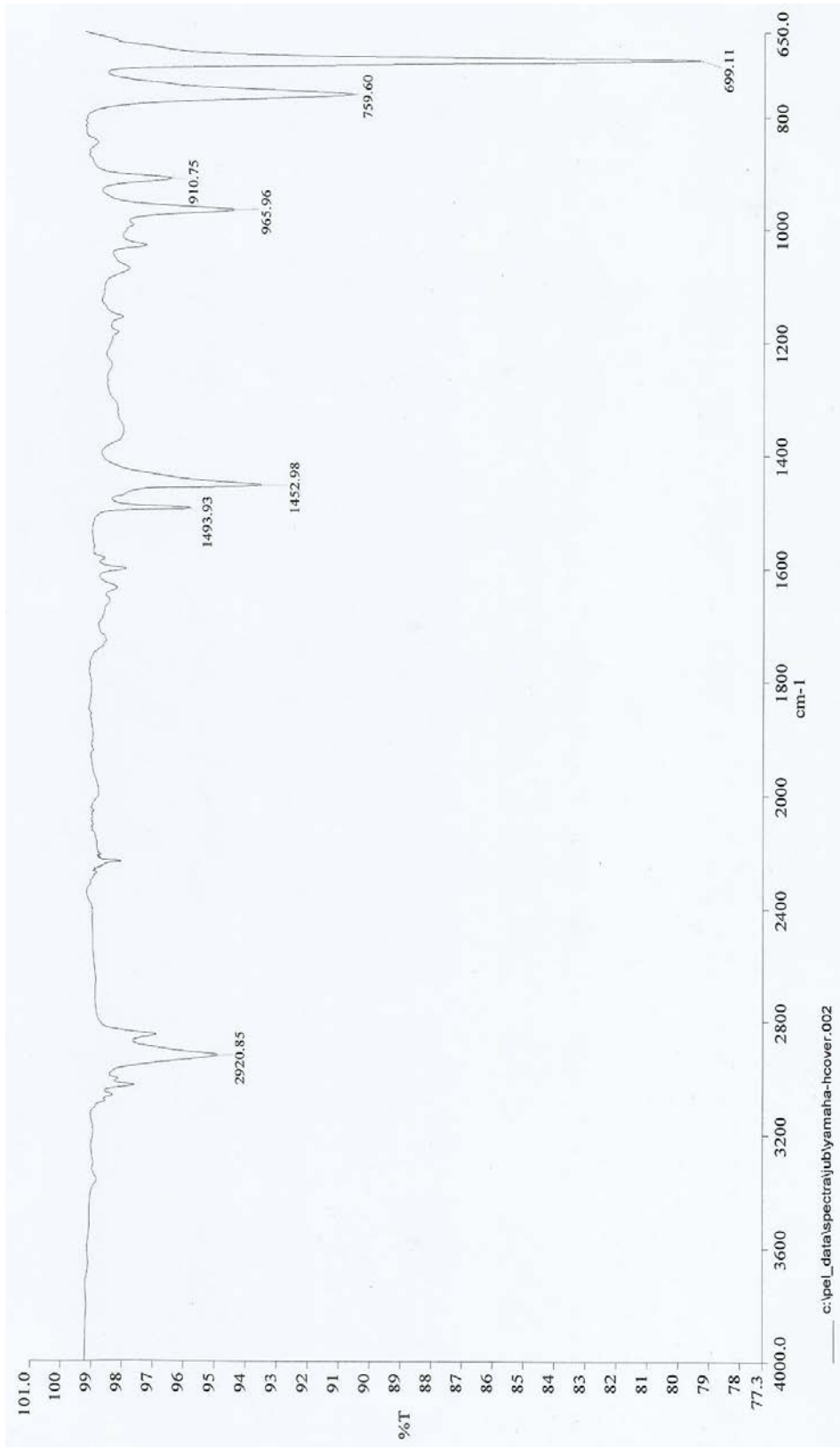
ภาพที่ 100 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกบั้งโคถนหลัง SUZUKI-BB



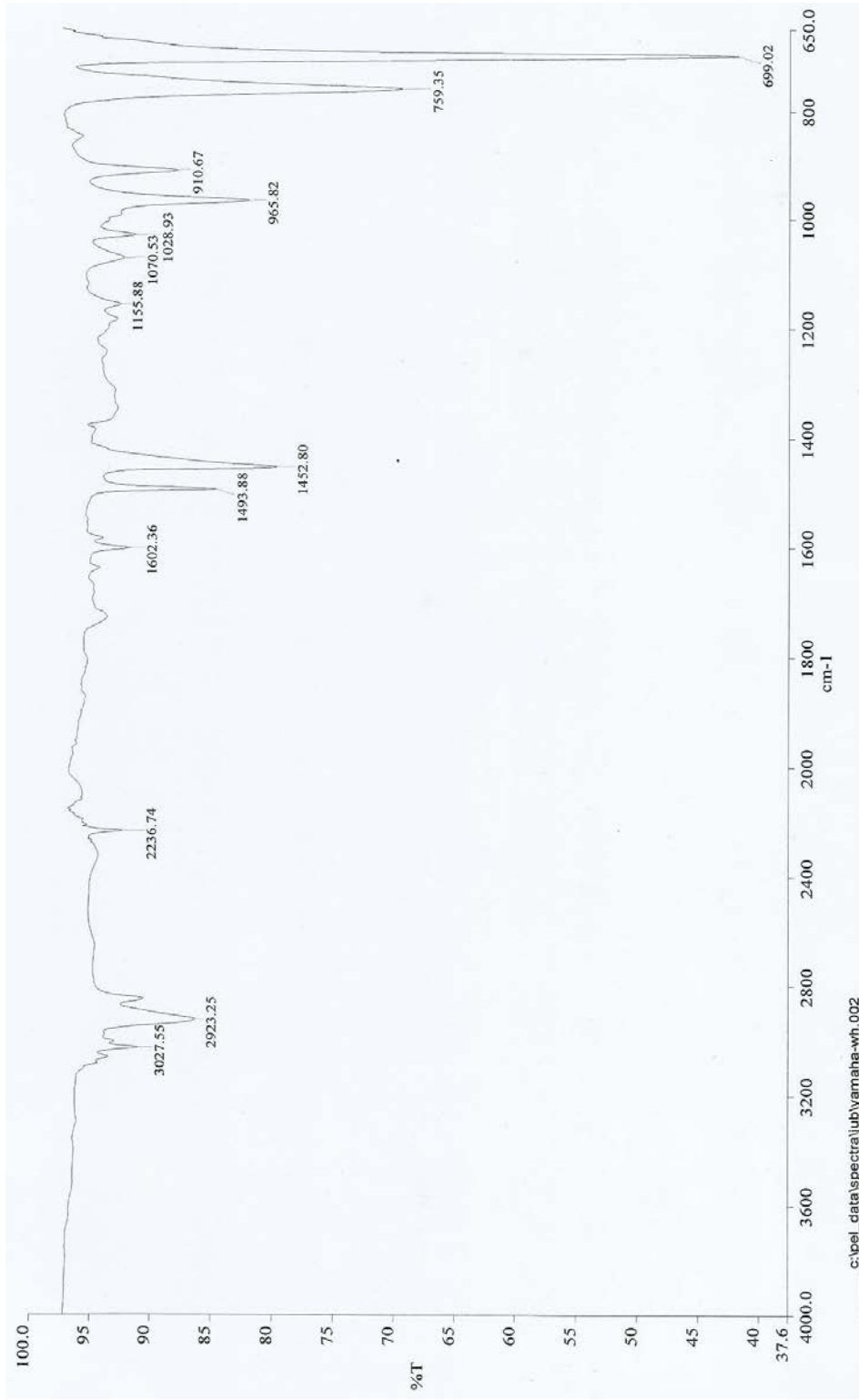
ภาพที่ 101 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกครอบเรือนวัสดุรอบ SUZUKI-Mcover



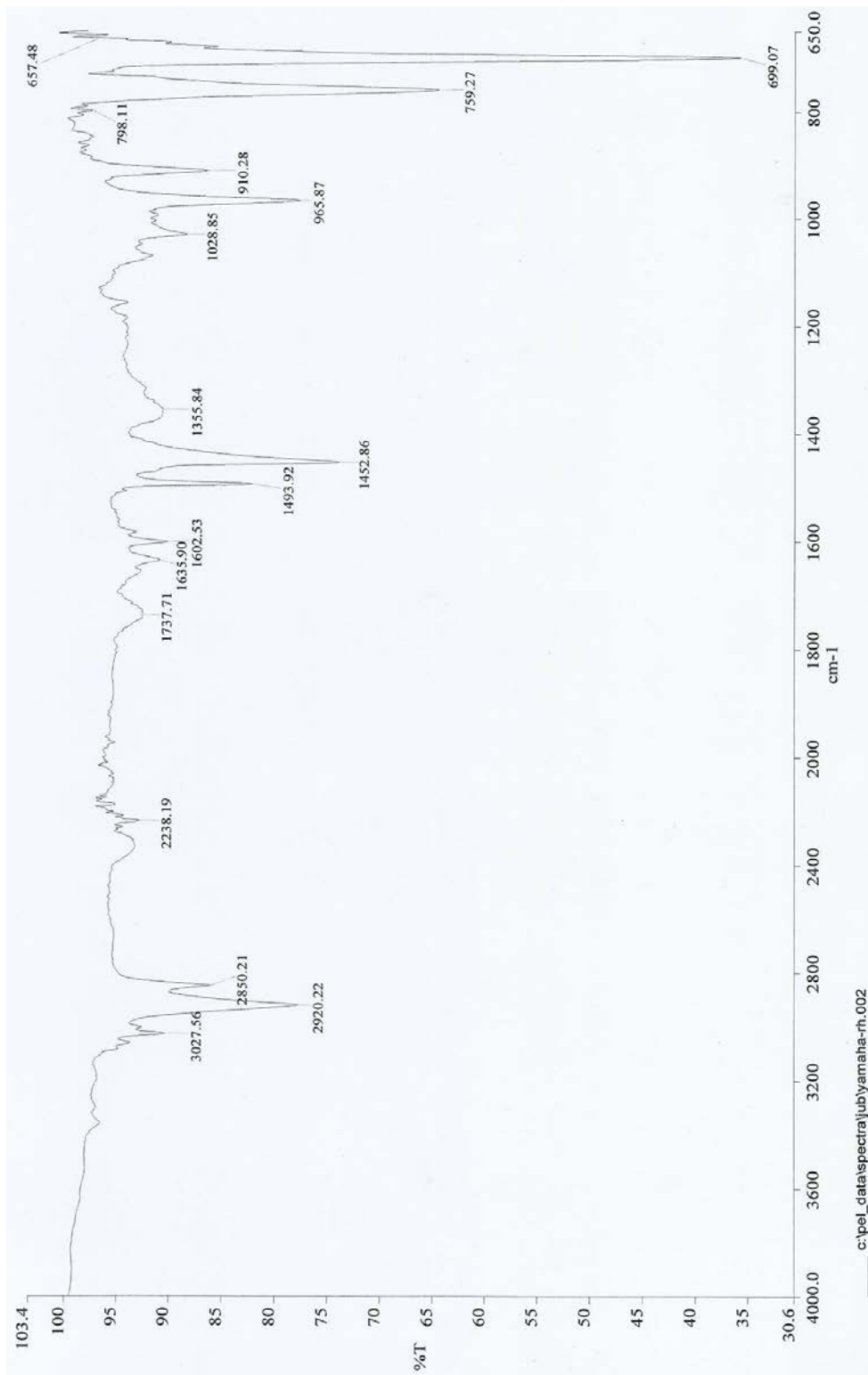
ภาพที่ 102 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกโคมไฟหลัง SUZUKI-LampT



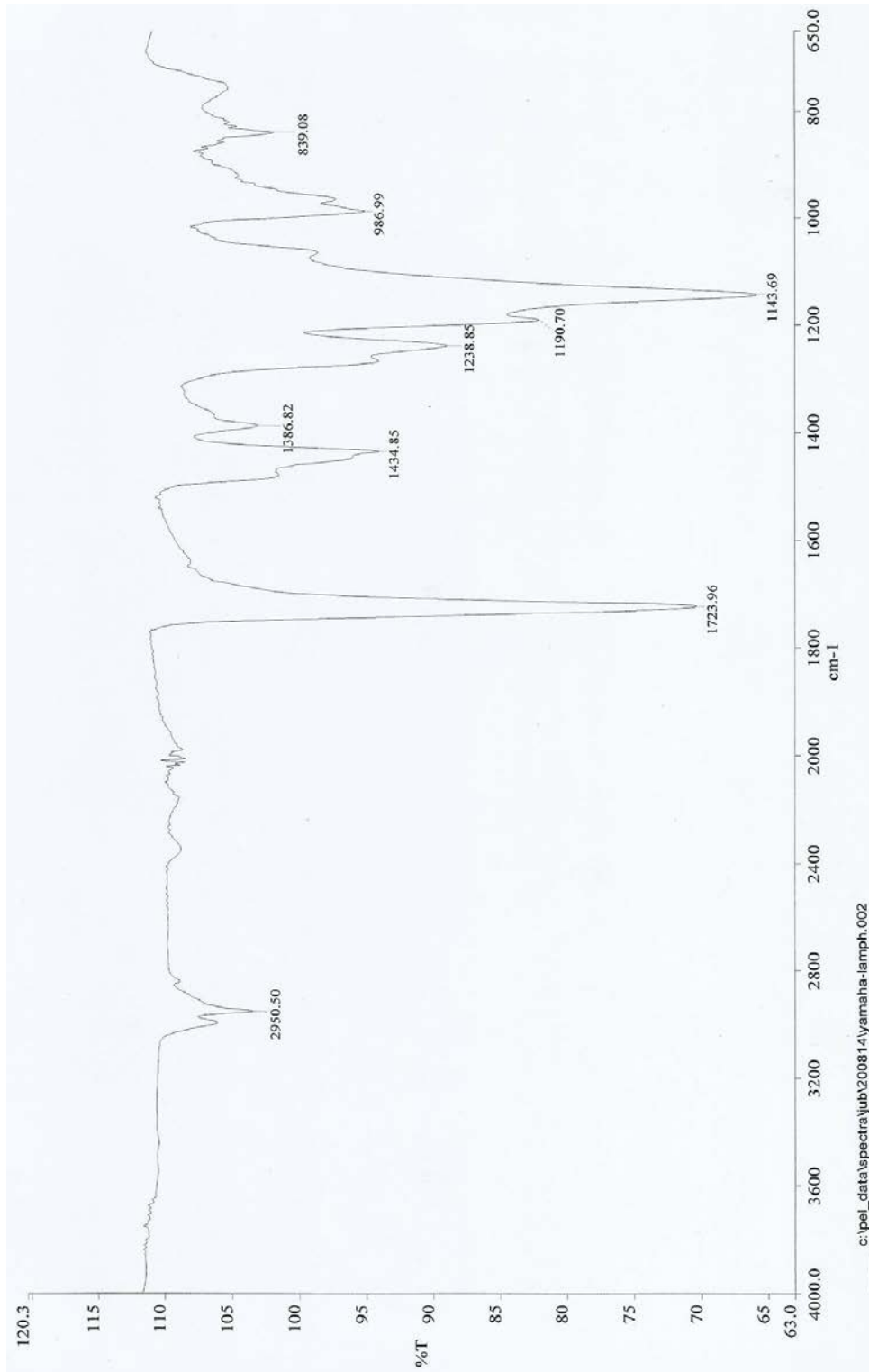
ภาพที่ 103 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกหุ้มมอเตอร์ YAMAHA-Hcover



ภาพที่ 104 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกบ่งคมหน้า YAMAHA -WH

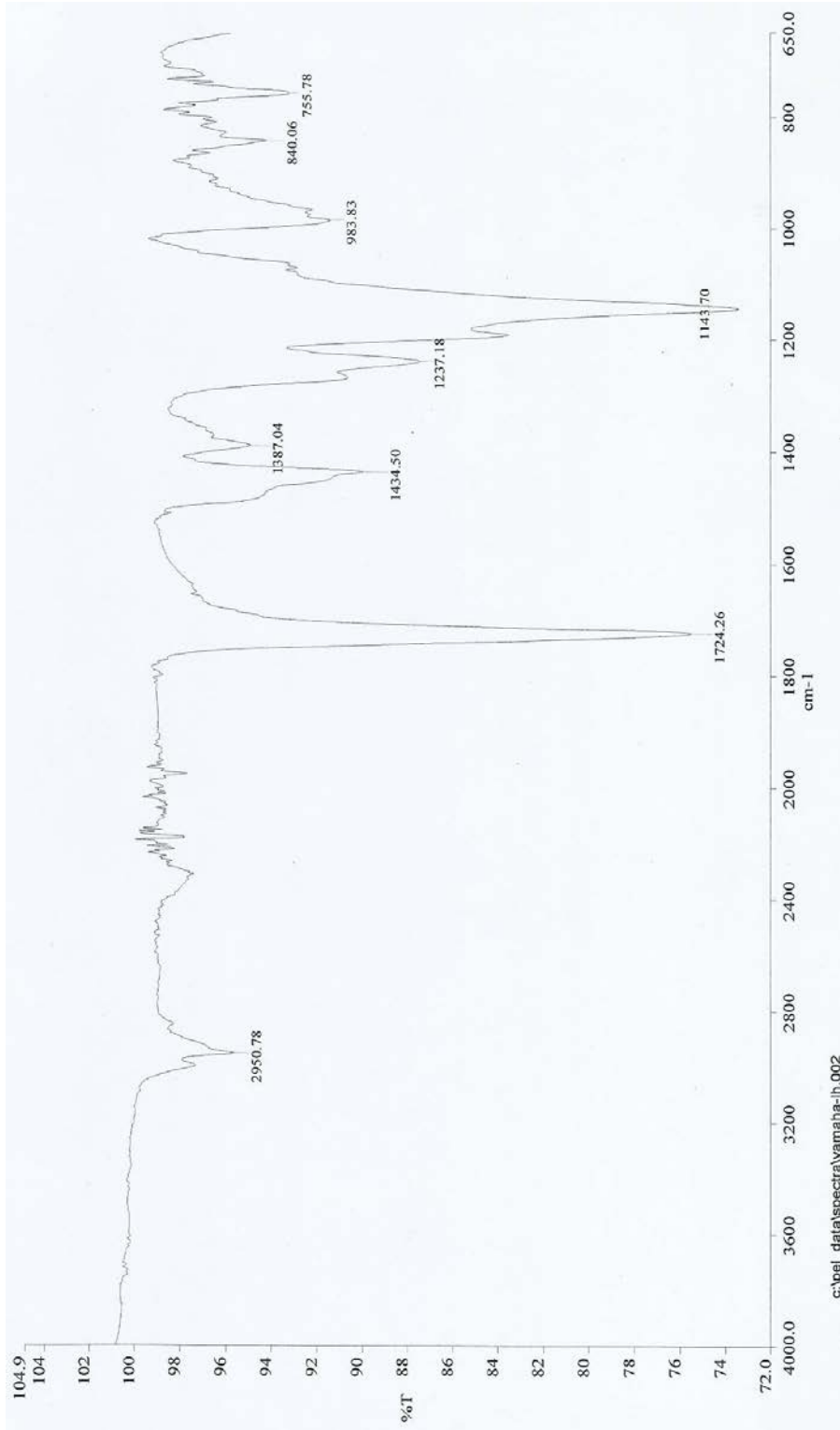


ภาพที่ 105 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกบั้งโคลนหน้า YAMAHA-RH

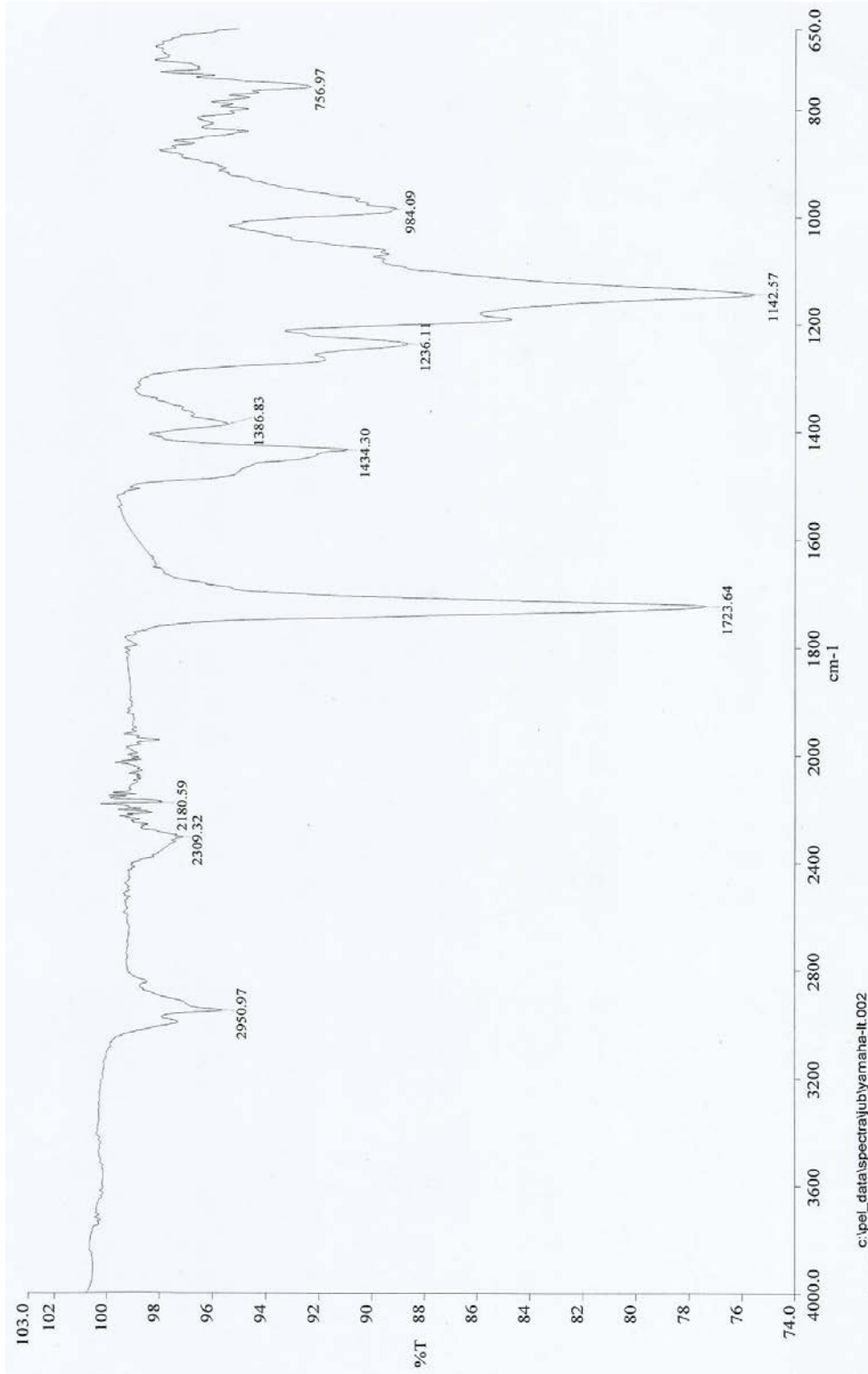


ภาพที่ 106 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติก โคมไฟหน้า YAMAHA-LampH

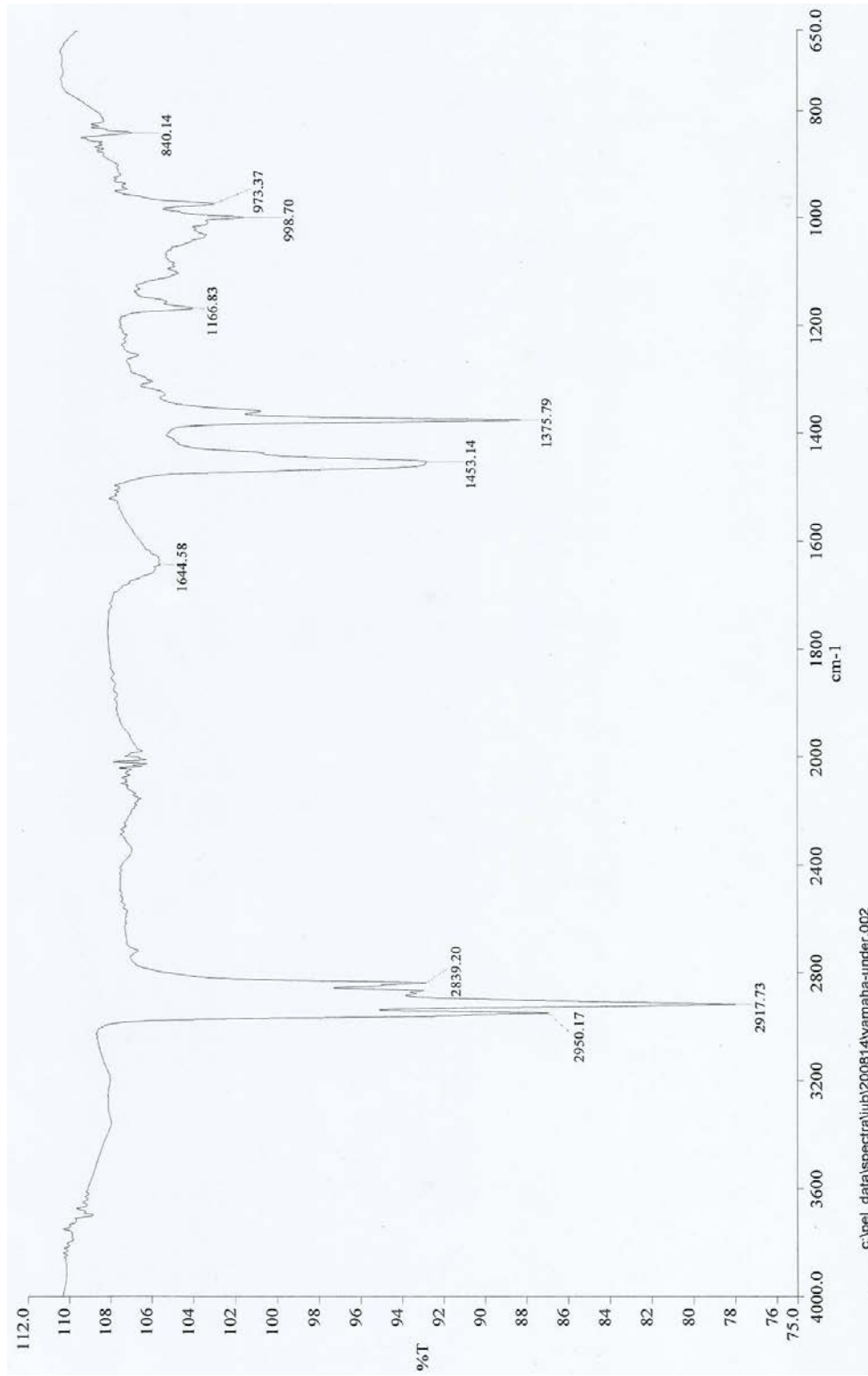




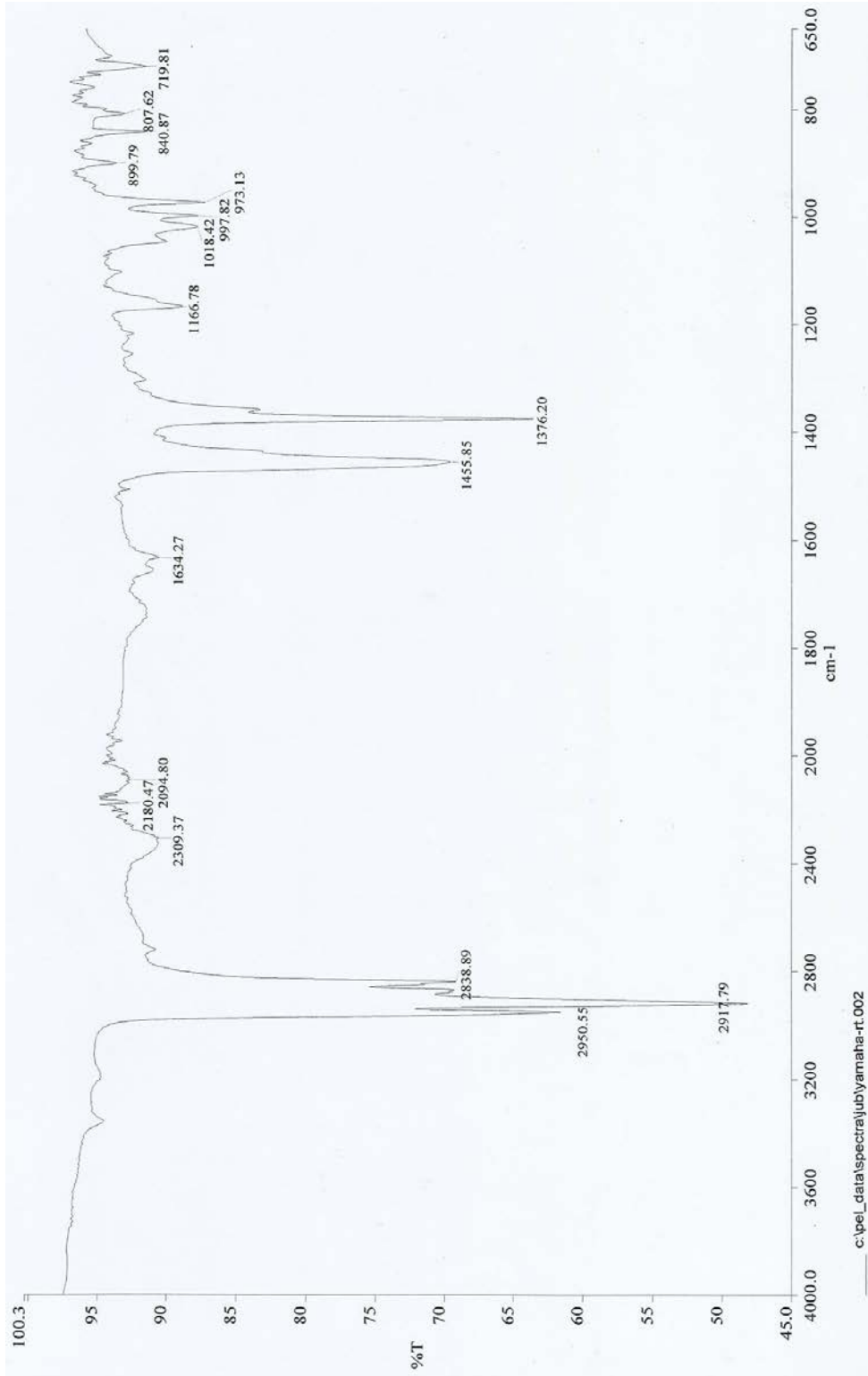
ภาพที่ 107 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกไฟเลียหน้า YAMAHA-LH



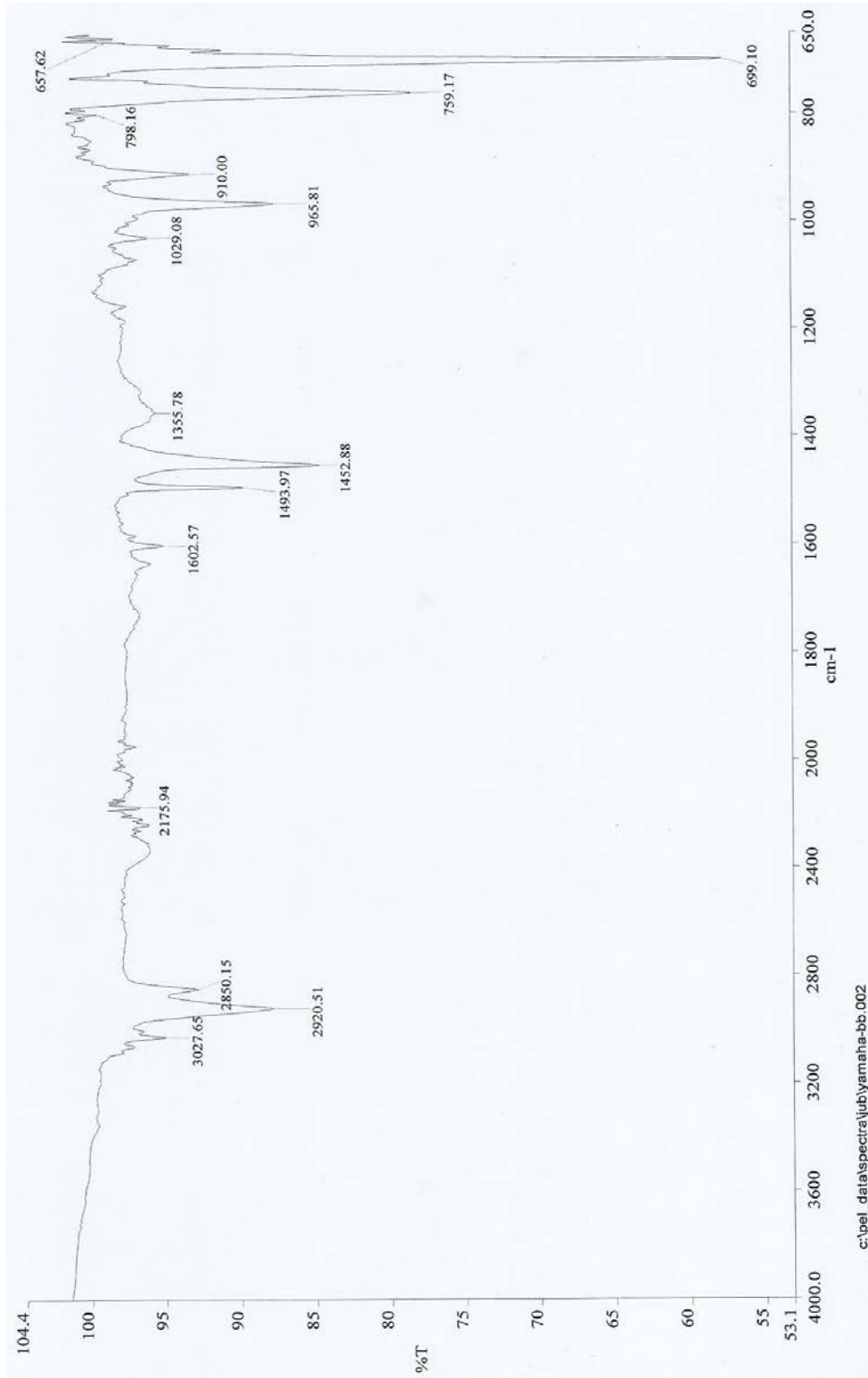
ภาพที่ 108 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกไฟเดียวหลัง YAMAHA-LT



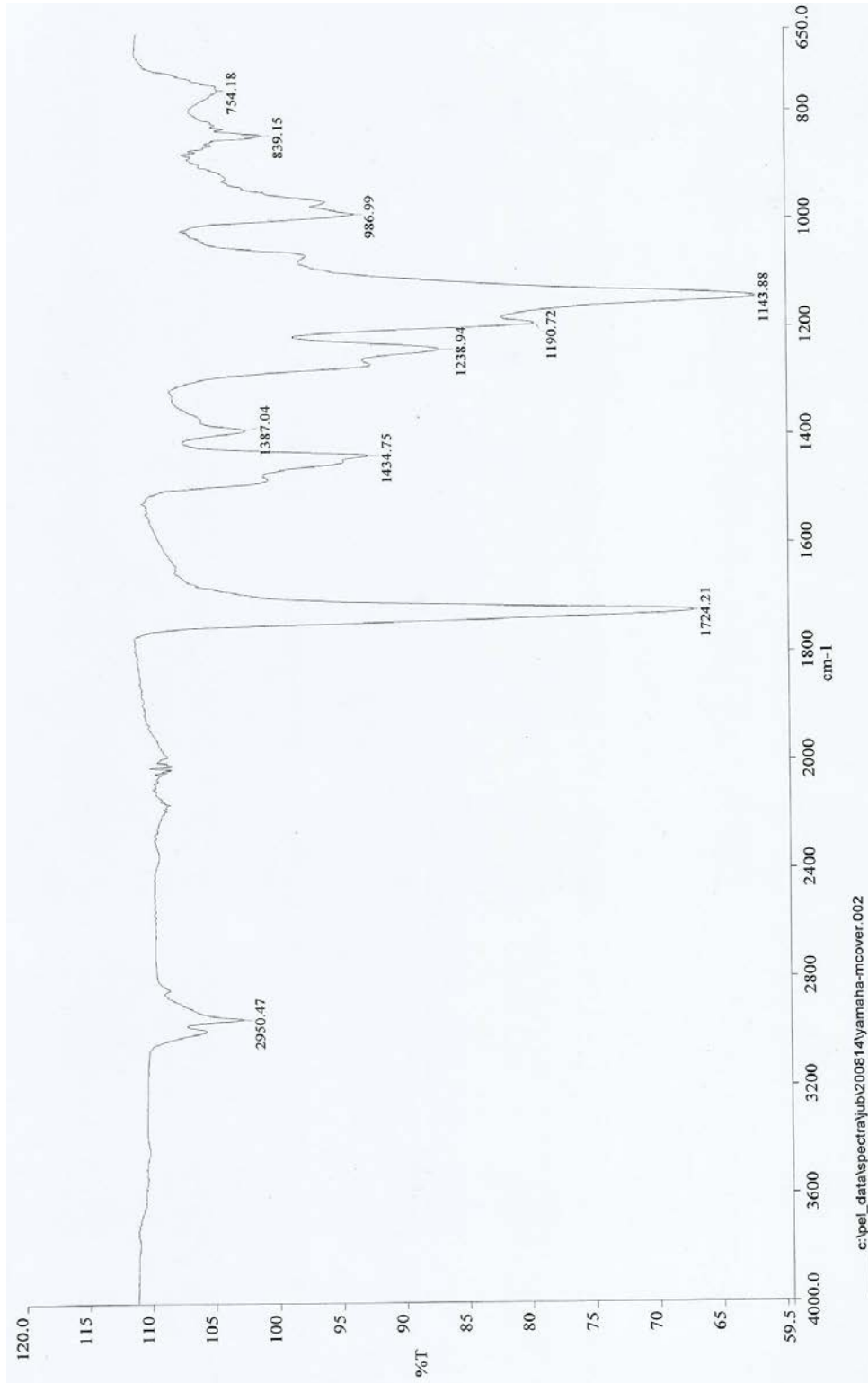
ภาพที่ 109 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกใต้รถยนต์ YAMAHA-Under



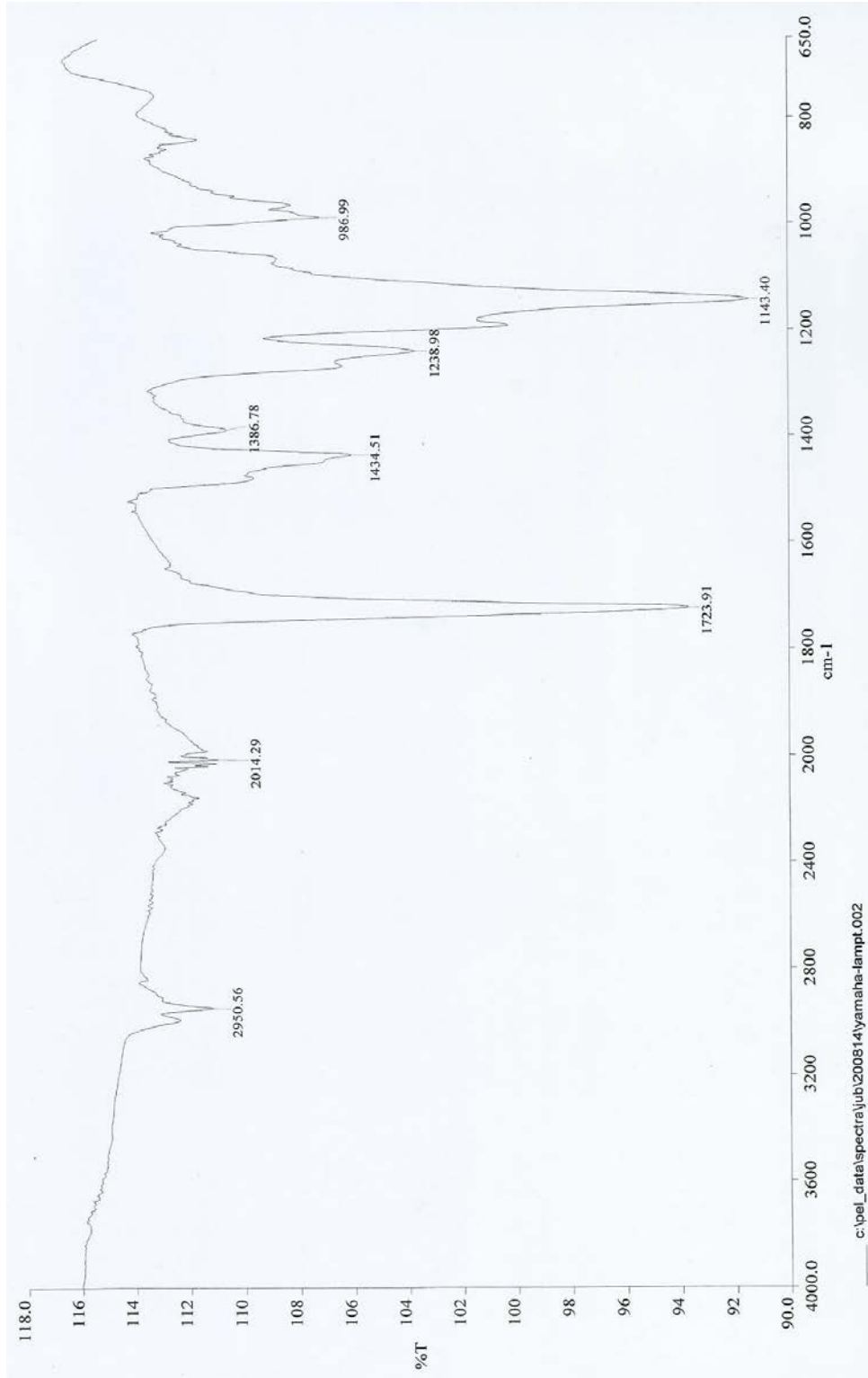
ภาพที่ 110 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกบั้งโคลนหลัง YAMAHA-RT



ภาพที่ 111 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกครอบตัวถัง YAMAHA-BB



ภาพที่ 112 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกครอบเรือนวัตรอบ YAMAHA-Mcover



ภาพที่ 113 สเปกตรัม FTIR ของพลาสติกโคมไฟหลัง YAMAHA-LampT

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-ชื่อสกุล	นางสาวพัทธนันท์ สงเดช
ที่อยู่	184 หมู่ 6 ตำบลนาโหนด อำเภอเมือง จังหวัดพัทลุง 93000
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2554	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2555-ปัจจุบัน	ศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2554-2556	นักวิทยาศาสตร์การแพทย์ สำนักกำกับพระราชบัญญัติเชื้อโรคและพิษจากสัตว์ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข
พ.ศ. 2556-ปัจจุบัน	นักวิทยาศาสตร์ สำนักพัฒนาระบบและรับรองมาตรฐานสินค้าปศุสัตว์ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

