



การตัดแยกชนิดพอลิเมอร์ที่ผ่านการใช้งานแล้วบนสายพานลำเลียงด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปี
อินฟราเรดย่านใกล้



โดย
นายจิรวุฒิ อินทจักร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การตัดแยกชนิดพอลิเมอร์ที่ผ่านการใช้งานแล้วบนสายพานลำเลียงด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้



โดย
นายจิรวุฒิ อินทจักร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

SORTING POST-CONSUMER POLYMER ON CONVEYOR BELT USING NIR
SPECTROSCOPY



By
MR. Jirawat INTAJAK

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2018

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	การตัดแยกชนิดพอลิเมอร์ที่ผ่านการใช้งานแล้วบนสายพานลำเลียง ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้
โดย	จิรวัดน์ อินทจักร
สาขาวิชา	วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	อาจารย์ ดร. ศราวุธ ภูไพบิจิตรกุล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(อาจารย์ ดร. ศราวุธ ภูไพบิจิตรกุล)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ศาสตราจารย์ ดร. ณัฐชยานัน พงศ์สถาปดี)

58402210 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : สเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้, เครื่องตัดแยกชนิดพลาสติก, ตัวอย่างพอลิเมอร์, ขยะพลาสติก

นาย จิรวัดน์ อินทจักร: การตัดแยกชนิดพอลิเมอร์ที่ผ่านการใช้งานแล้วบนสายพานลำเลียงด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อาจารย์ ดร. ศรารัฐ ภูไพจิตรกุล

อุตสาหกรรมตัดแยกขยะพลาสติกในปัจจุบัน ทำการแยกชนิดพลาสติกจากสัญลักษณ์ด้วยแรงงานคน หรืออาศัยคุณสมบัติทางกายภาพในการแยกด้วยเครื่องจักร เช่น การแยกชนิดตามความหนาแน่นโดยการจมลอย เป็นต้น กระบวนการดังกล่าวไม่สามารถใช้กับขยะพลาสติกที่ไม่มีสัญลักษณ์ หรือ ขยะมีการเติมสารเติมแต่งจนทำให้ค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วงเดียวกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น การนำเทคโนโลยีสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้มาใช้ในการตัดแยกพลาสติก โดยอาศัยการดูดกลืนพลังงานตามหมู่ฟังก์ชันทางเคมี จะให้ความแม่นยำสูงและรวดเร็ว แต่มีข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจากอุปกรณ์วัดในช่วง 900-2500 นาโนเมตร มีราคาสูง ในงานวิจัยนี้จึงสนใจในการนำเทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในช่วงความยาวคลื่น 400-1000 นาโนเมตร ที่ใช้อุปกรณ์วัดที่ราคาไม่สูงมาก มาประยุกต์ใช้ในการตัดแยกชนิดพลาสติก โดยในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยการสร้างเครื่องวัดสเปกตรัมบนสายพานลำเลียง สแกนสเปกตรัมตามแนวขวางของสายพาน (line scan) ผ่านระบบเลนส์และเกรตติงเพื่อให้ได้ภาพสเปกตรัม ทำการปรับเทียบตำแหน่งของภาพของแหล่งกำเนิดแสง กับตำแหน่งความยาวคลื่นที่วัดได้โดยใช้เครื่อง multispectrometer จากนั้นทำการวัดสเปกตรัมของชิ้นงานขยะจำลอง ที่ขึ้นรูปด้วย ด้วยวิธี Compression molding ของพอลิเมอร์ 5 ชนิด คือ PET, HDPE, PP, PS และ PVC โดยขึ้นรูปพอลิเมอร์บริสุทธิ์ สีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน ความหนาสามระดับ และนำตัวอย่างไปขีดผิวหน้าเพื่อให้เกิดการกระเจิงของแสง นำข้อมูลสเปกตรัมของพอลิเมอร์ตัวอย่างไปวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Principle component analysis (PCA) เพื่อให้ได้เมตริกซ์โหลดตั้งสำหรับทำนายชนิดพอลิเมอร์ของชิ้นงานตัวอย่าง และนำไปทำนายขยะพลาสติกจริง ผลการทดลองพบว่าเครื่องตัดแยกสามารถระบุชนิดพลาสติกของขยะตัวอย่างได้ความถูกต้องสูงกว่า 60% และ 20-50% สำหรับขยะจริง โดยพอลิเมอร์ที่มีร้อยละความบริสุทธิ์สูงที่สุดในการตัดแยก คือ PVC

58402210 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : near infrared spectroscopy, plastic sorting machine, polymer sample, plastic waste

MR. JIRAWAT INTAJAK : SORTING POST-CONSUMER POLYMER ON CONVEYOR BELT USING NIR SPECTROSCOPY THESIS ADVISOR : SARAWUT PHUPAICHITKUN, Dr.Agr

Sorting plastic waste in Thailand usually done by manual using recycle sign or by physical sorting such as float-sink. Due to no recycle sign on products and some heavy filler might effected to density thus could be a mistaken in sorting machine. Using near infrared spectroscopy, the identification is fast and high accuracy but the IR-Sensor in the range of 900 to 2500 nm is very intensive cost. In this research was interested in using low cost sensor (400-1000 nm) for sorting plastic types. The first part of this research was design and instruct the NIR line scan system on conveyor. Reflection spectra from the samples across the conveyor is collected by lens system and grating to the IR image sensor. The wavelength position on image is calibrated using that of the laser light measured by multispectrometer (Tec5 AG, Germany). Spectra of polymer samples (PET, HDPE, PP, PS and PVC) prepared by compression molding is measured. The spectra of samples with various colors, thickness and roughness was measuring and statistically analyzed by using Principle component analysis (PCA) method. Loading matrix of synthetic waste are using for identify the type of polymer at 60% purification. And its decreases to 20-50% for the real plastic waste. PVC was the highest in %Purification.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีนั้น เป็นผลมาจากการได้รับความอนุเคราะห์จากหลายๆ ฝ่าย ทั้งนี้ต้องขอขอบคุณ อาจารย์ศราวุธ ภูไพจิตรกุล อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ที่ท่านได้กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ เมื่อมีปัญหาและอุปสรรคตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้ และขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ศาสตราจารย์ ดร.ณัฐยานัน พงศ์สถาปติ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ นาย ทรงยศ บุญคง นักศึกษาปริญญาโทสาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ซึ่งเคยเป็นหัวหน้าทีมสร้างเครื่อง NIR line scan Ia จนสามารถใช้งานได้ นาย ทศพล นาคู สำหรับการเขียนชุดคำสั่งบนโปรแกรม Labview ให้ NIR line scan สามารถใช้งานได้

ขอขอบคุณ นางสาวแพรวพลอย ศรีหมอกอุ้น นางสาวสุภาภรณ์ ขำดี นายนนทพัทธ์ อ่อนมันคง สำหรับงานวิจัยในหัวข้อ การวิเคราะห์แยกชนิดพลาสติกด้วยเทคนิค FTIR และ NIR ด้วยโปรแกรม The Unscrambler สำหรับการเป็นพื้นฐานของงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีอาหารที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่อง multispectrometer ในการนำมาเป็นเครื่องมาตรฐานในการเปรียบเทียบความยาวคลื่น

ขอขอบคุณบริษัท ดับบลิวเจเทคโนโลยี จำกัด ที่ช่วยเหลือในด้านการจัดหาทุนสนับสนุน และจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการสร้างเครื่องคัดแยกขยะพลาสติกเครื่องต้นแบบ และคอยสนับสนุนในการสร้างอุปกรณ์ส่วนยึดจับ และสายพานลำเลียง ทำให้ได้เครื่องต้นแบบที่สมบูรณ์

และขอขอบคุณบิดา และมารดา ที่คอยให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน และในการศึกษาต่อในระดับปริญญาโทจนสำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

จิรวัดณ์ อินทจักร

สารบัญ

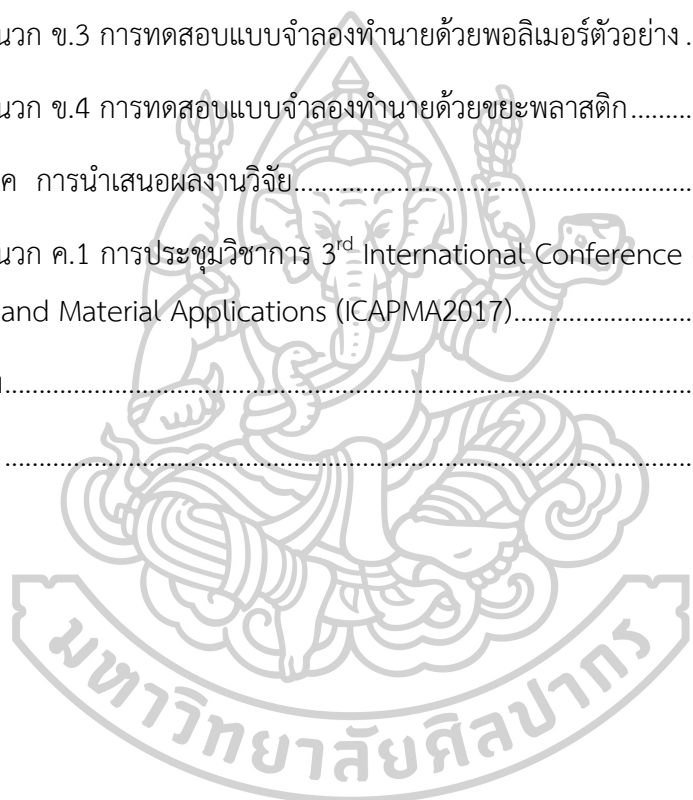
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉุ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 เหตุผลและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 แนวคิดของงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.5.2 ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการทดลอง.....	2
1.5.3 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	2
ตอนที่ 1 ออกแบบเครื่องสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้บนสายพานลำเลียง และ สร้างเครื่อง.....	2
ตอนที่ 2 การขึ้นรูปพอลิเมอร์.....	3
ตอนที่ 3 การเก็บข้อมูลสเปกตรัม และการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองทำนาย	3
1.5.4 วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย.....	3
1.5.5 นำเสนอผลงานวิจัย.....	3

1.5.6 จัดทำรายงานสรุปโครงการวิจัย	3
1.5.7 เสนอผลงานวิจัย.....	3
1.5.8 การสอบโครงการวิจัย	3
1.5.9 บทความวิจัย	3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ปัญหาของขยะและวิธีการแยก	4
2.2 อินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared)	8
2.2.1 หลักการของสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้	8
2.2.2 อินฟราเรดย่านใกล้ Near-infrared (NIR) spectrometry	10
2.3 การใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการจำแนกขยะพลาสติก.....	11
2.3.1 ข้อแตกต่างของเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้และสเปกโตรอินฟราเรดย่าน กลาง 13	
2.3.2 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่อง NIR[13].....	17
แหล่งกำเนิดรังสี (Radiation source)	17
อุปกรณ์เลือกความยาวคลื่น (Wavelength selection devices).....	17
อุปกรณ์ตรวจจับ (Detectors).....	18
ซอฟต์แวร์ (Software).....	19
2.3.3 อัลกอริทึมของการวิเคราะห์แบบ Principle Component Analysis (PCA).....	20
2.3.4 การปรับสเปกตรัมให้มีมาตรฐานเดียวกัน	20
Savitzky–Golay Filter.....	21
วิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานและการปรับแนวโน้ม (Standard Normal Variate (SNV) และ Detrending)	21
การปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ (Multiplicative scatter correction, MSC).....	22

บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย	24
3.1	ออกแบบเครื่องสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้บนสายพานลำเลียง และสร้างเครื่องขั้นตอนการ Calibrate เครื่อง	24
3.1.1	ออกแบบเครื่องสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้บนสายพานลำเลียง (NIR LineScan)	24
	กำลังการผลิต หรือ กำลังในการแยกขยะพลาสติก	24
	ระบบสายพานลำเลียง	24
	แหล่งกำเนิดแสง ระบบวัดสเปกตรัม	25
3.1.2	การเปรียบเทียบเครื่องมือวัดสเปกตรัมบนสายพานกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน	25
3.2	การเตรียมตัวอย่างขึ้นพลาสติกเพื่อการสร้างแบบจำลองทำนายชนิดพลาสติก (Calibration model)	25
3.2.1	นำเม็ดพลาสติกไปขึ้นรูปด้วยวิธี Compression molding โดยใช้โมลรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 30 ตารางเซนติเมตร ที่มีความหนา 1 3 และ 5 มิลลิเมตร	25
3.2.2	การเก็บข้อมูลสเปกตรัมเพื่อนำไปสร้างแบบจำลองทำนาย	27
3.3	ขั้นตอนการหาสมการทำนายชนิดขยะพลาสติก	27
3.3.1	การปรับปรุงสเปกตรัม	27
3.3.2	การวิเคราะห์แยกกลุ่มตัวอย่างพอลิเมอร์	27
3.4	การทดสอบการจำแนกชนิดขยะบนสายพานลำเลียงขนาดความกว้าง 80 เซนติเมตร (NIR LineScan lb)	27
3.4.1	การสร้างแบบจำลองทำนายชนิดพลาสติกบนสายพานสำหรับเครื่อง (NIR LineScan lb)	27
บทที่ 4	ผลการทดลอง	29
4.1	โครงสร้าง องค์ประกอบ และขั้นตอนการเปรียบเทียบ	29
4.1.1	โครงสร้าง องค์ประกอบทั่วไปของเครื่องแยกชนิดขยะด้วยแสงที่เห็นด้วยตาและอินฟราเรดย่านใกล้ (400-1000 nm) และขั้นตอนการเปรียบเทียบ	29
	การออกแบบเครื่อง NIR line scan	29

4.2 ผลกระทบของชนิดของพอลิเมอร์ สี ความหนา สภาพพื้นผิว ต่อสเปกตรัมดิบ.....	32
4.2.1 สเปกตรัมดิบจากเครื่อง Multispectrometer.....	32
4.2.2 สเปกตรัมที่วัดได้จากเครื่อง NIR LineScan Ib (400-1000 nm, 80 cm).....	34
4.2.3 การปรับปรุงสเปกตรัมที่วัดได้จากเครื่อง NIR LineScan Ib (400-1000 nm, 80 cm)	
37	
การกำจัดสัญญาณรบกวนโดยเทคนิค Savitzky-Golay โดยใช้ n=10 และ n=20.....	37
4.3 การสร้างแบบจำลองทำนายค่า PC เพื่อใช้ในการแยกกลุ่ม และ ประสิทธิภาพในการแยก....	40
4.3.1 การวิเคราะห์กลุ่มตัวอย่างด้วยเทคนิค Principle Component Analysis (PCA)	40
การคัดแยกชนิดพอลิเมอร์บริสุทธิ์	40
การคัดแยกพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่สีต่างกัน	42
การคัดแยกพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่มีความหนาของชั้นงานต่างกัน	47
การคัดแยกพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่มีลักษณะพื้นผิวของชั้นงานต่างกัน	48
การคัดแยกพอลิเมอร์โดยรวมทุกเงื่อนไขเข้าด้วยกัน.....	49
4.3.2 PCA (MPA, Multispectrometer, NIR LineScan Ia, NIR LineScan Ib) หลังการ ปรับปรุงสเปกตรัม.....	52
การคัดแยกชนิดพอลิเมอร์บริสุทธิ์.....	52
การคัดแยกพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่สีต่างกัน	55
การคัดแยกพอลิเมอร์โดยรวมทุกเงื่อนไขเข้าด้วยกัน.....	58
4.3.3 การทำนายชนิดขยะด้วยเครื่อง NIR Line scan Ib	61
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	66
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ	66
ภาคผนวก	67
ภาคผนวก ก สเปกตรัมดิบของพอลิเมอร์	68

ภาคผนวก ก.1 สเปกตรัมของพอลิเมอร์แต่ละชนิดของเครื่อง Multispectrometer.....	69
ภาคผนวก ก.2 สเปกตรัมของพอลิเมอร์แต่ละชนิดของเครื่อง NIR line scan Ib.....	79
ภาคผนวก ก.3 สเปกตรัมของสายพายลำเลียง.....	89
ภาคผนวก ข กราฟ PCA และโหลดติง (Loading) ของการคัดแยกพอลิเมอร์สีแต่ละชนิด.....	90
ภาคผนวก ข.1 PCA การคัดแยกสีพอลิเมอร์แต่ละชนิดของเครื่อง Multispectrometer.....	91
ภาคผนวก ข.2 PCA การคัดแยกสีพอลิเมอร์แต่ละชนิดของเครื่อง NIR line scan Ib.....	96
ภาคผนวก ข.3 การทดสอบแบบจำลองทำนายด้วยพอลิเมอร์ตัวอย่าง	101
ภาคผนวก ข.4 การทดสอบแบบจำลองทำนายด้วยขยะพลาสติก.....	102
ภาคผนวก ค การนำเสนอผลงานวิจัย.....	107
ภาคผนวก ค.1 การประชุมวิชาการ 3 rd International Conference on Applied Physics and Material Applications (ICAPMA2017).....	108
รายการอ้างอิง.....	114
ประวัติผู้เขียน	118



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 พอลิเมอร์ 5 ชนิดและการนำไปประยุกต์ใช้งาน [7].....	5
ตารางที่ 2 ช่วงของรังสีอินฟราเรด [5, 7].....	8
ตารางที่ 3 เลขคลื่นและความยาวคลื่นองค์ประกอบต่างๆ ของพอลิเมอร์ 5 ชนิดที่ปรากฏในแถบสเปกตรัม NIR.....	10
ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้และสเปกโตรอินฟราเรดย่านกลาง [2, 16, 17].....	16
ตารางที่ 5 สภาวะการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธี Compression Molding.....	26
ตารางที่ 6 สารเติมแต่งต่างๆ ที่มีการผสมในเม็ดสีพอลิเมอร์แต่ละชนิด.....	26
ตารางที่ 7 เปรียบเทียบเครื่อง NIR LineScan Ia และ LineScan Ib.....	31
ตารางที่ 9 ผลการทดลองแบบจำลองทำนายด้วยพลาสติกตัวอย่าง.....	63
ตารางที่ 10 ผลการทดสอบกับขยะพลาสติก.....	64



สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ส่วนประกอบและการทำงานของ Pneumatic separator [10]	7
ภาพที่ 2 Cylindrical Centrifugal Force Separator (CFS) [10]	7
ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนในแถบโอเวอร์โทนอันดับต่างๆ [5, 7]	9
ภาพที่ 4 สเปกตรัมของพลาสติกแต่ละชนิด [14]	12
ภาพที่ 5 การสั่นแบบพื้นฐานแต่ละแบบ [15]	13
ภาพที่ 6 ลของสารปนเปื้อน ฉลากกระดาษและฉลากพลาสติกที่ส่งผลต่อความเข้มของสเปกตรัม ...	15
ภาพที่ 7 สเปกตรัม ที่ได้รับผลกระทบแบบผลคูณ (multiplicative effect) หลังจากการปรับแก้ด้วย SNV [19]	22
ภาพที่ 8 แสดงสเปกตรัม ที่ได้รับผลกระทบแบบผลคูณ (multiplicative effect) ก่อน และหลังปรับแก้ด้วย MSC [20]	23
ภาพที่ 9 ลักษณะและส่วนประกอบของเครื่อง NIR LineScan Ia	30
ภาพที่ 10 ลักษณะและส่วนประกอบของเครื่อง NIR line scan Ib	31
ภาพที่ 11 ตัวอย่างชิ้นงานที่เตรียมได้และสเปกตรัมของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้ง 5 ชนิด	32
ภาพที่ 12 สเปกตรัมดิบของพลาสติกชนิด HDPE สีแดง สีน้ำเงินและสีเขียว	33
ภาพที่ 13 สเปกตรัมดิบที่มีผลจากความหนาของชิ้นงานที่ต่างกัน (ซ้าย) และผลจากลักษณะพื้นผิวที่ต่างกัน (ขวา)	34
ภาพที่ 14 สเปกตรัมดิบ 400-1000 nm line scan Ib	35
ภาพที่ 15 สเปกตรัมพอลิเมอร์ 5 ชนิดหลังการปรับปรุงด้วยวิธีของ Savitzky-Golay	35
ภาพที่ 16 สเปกตรัมดิบของพลาสติกชนิด PET สีแดง สีน้ำเงินและสีเขียว	36
ภาพที่ 17 สเปกตรัมดิบของพลาสติกชนิด PVC ที่ความหนา 1, 3 และ 5 mm	37
ภาพที่ 18 สเปกตรัมดิบ สเปกตรัมที่ผ่านตัวกรองแบบ Savitzky-Golay ที่ n=10 และ n=20	38

ภาพที่ 19 สเปกตรัมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยวิธี Standard Normal Variate (SNV) และ Multiplicative scatter correction (MSC).....	39
ภาพที่ 20 PCA และ loading ของการคัดแยกพอลิเมอร์บริสุทธิ์ของเครื่อง Multispectrometer..	41
ภาพที่ 21 PCA และ loading ของการคัดแยกพอลิเมอร์บริสุทธิ์ของเครื่อง NIR line scan.....	42
ภาพที่ 22 PCA และ loading ของการคัดแยกสปี PET และ HDPE ของเครื่อง Multispectrometer	45
ภาพที่ 23 PCA และ loading ของการคัดแยกสปี PET และ HDPE ของเครื่อง NIR line scan.....	47
ภาพที่ 24 PCA ของพอลิเมอร์ที่มีความหนาต่างกัน.....	48
ภาพที่ 25 PCA และ loading ของพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่มีลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานต่างกัน.....	49
ภาพที่ 26 PCA ของ Multispectrometer.....	50
ภาพที่ 27 โหลดดิงของ PCA ของ Multispectrometer.....	50
ภาพที่ 28 PCA และ loading จากเครื่อง NIR line scan ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสเปกตรัมขั้นที่ 2...51	
ภาพที่ 29 PCA และ loading ของเครื่อง multispectrometer หลังปรับปรุงสเปกตรัมด้วยวิธี SNV	53
ภาพที่ 30 PCA และโหลดดิงของการแยกพอลิเมอร์บริสุทธิ์ หลังปรับปรุงสเปกตรัมด้วยวิธี SNV	54
ภาพที่ 31 PCA และโหลดดิงการแยกพอลิเมอร์ที่ต่างกัน หลังปรับปรุงสเปกตรัมด้วยวิธี SNV ของเครื่อง Multispectrometer.....	56
ภาพที่ 32 PCA และโหลดดิงการแยกพอลิเมอร์ที่ต่างกัน หลังปรับปรุงสเปกตรัมด้วยวิธี SNV ของเครื่อง NIR line scan	58
ภาพที่ 33 กราฟ PCA ที่ได้จากสเปกตรัมที่ทำการปรับปรุงด้วยวิธี SNV และ Normalization ของเครื่อง Multispectrometer.....	59
ภาพที่ 34 กราฟ PCA ของเครื่อง Line scan Ia ที่ปรับปรุงสเปกตรัมด้วยวิธี SNV.....	59
ภาพที่ 35 กราฟ PCA ของสเปกตรัมที่ถูกปรับปรุงด้วย NORM01.....	60
ภาพที่ 36 โหลดดิงของกราฟ PCA ของสเปกตรัมที่ถูกปรับปรุงด้วย NORM01	61
ภาพที่ 37 หน้าจอของโปรแกรม Labview.....	63

ภาพที่ 38 ภาพที่ได้จากการนำขยะพลาสติกจริงไปวางไว้บนสายพานลำเลียง.....65



บทที่ 1

บทนำ

1.1 เหตุผลและความสำคัญของปัญหา

พอลิเมอร์ เป็นวัสดุที่มีการใช้งานเป็นอย่างมากในปัจจุบัน พอลิเมอร์ที่พบเห็นได้ส่วนมากจะเป็นพวกพลาสติก เนื่องจากสามารถขึ้นรูปได้ง่ายและผลิตได้เป็นจำนวนมาก มีชนิดและสมบัติที่หลากหลายให้เลือกใช้ได้ตามความต้องการ ราคาถูกกว่าวัสดุอื่นๆ แต่ในความสะดวกทั้งหลายนี้จึงก่อให้เกิดขยะจำนวนมาก มีทั้งขยะที่มาจากครัวเรือนและอุตสาหกรรม จนกลายเป็นปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน ในอดีตนิยมการกำจัดโดยการฝังกลบ การกำจัดขยะพลาสติกในปัจจุบันมีผู้คนเริ่มให้ความสนใจในการนำขยะพลาสติกกลับมาใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นการใช้ซ้ำ การนำไปรีไซเคิลเป็นวัตถุดิบ การนำไปเผาแบบไพโรไลซิสเพื่อเปลี่ยนพลาสติกเป็นเชื้อเพลิง [1] หรือการนำไปเผาเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง [2] แต่ถึงอย่างนั้นก็ยังมีความกังวลใจเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมเมื่อเกิดการสลายตัว ทางเลือกหนึ่งที่สำคัญในการกำจัดขยะพลาสติก คือ การนำพลาสติกเหล่านั้นมารีไซเคิล หรือการนำไปหลอมขึ้นรูปเพื่อนำมาใช้งานใหม่อีกครั้ง ซึ่งการจะได้พลาสติกรีไซเคิลที่ยังมีสมบัติที่ดีควรใช้พลาสติกชนิดเดียวกัน หรือสีเดียวกันมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้น การนำพลาสติกที่ผสมปนกันอยู่มาใช้งานอาจจะทำให้สมบัติการยืดหยุ่นลดลงอย่างมาก หรือพลาสติกบางชนิดก็ไม่สามารถเอามาหลอมขึ้นรูปใหม่ได้ จึงควรต้องทำการแยกชนิดพลาสติกก่อนที่จะนำไปหลอมขึ้นรูปใหม่ และหากสามารถคัดแยกขยะพลาสติกให้มีความบริสุทธิ์สูงก็จะทำให้สามารถนำไปใช้งานได้ดียิ่งขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการหลอมใหม่หรือการเผาเป็นพลังงาน ปัจจุบันอุตสาหกรรมการแยกขยะจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญมากขึ้น การแยกชนิดขยะในเบื้องต้นจะใช้แรงงานในการแยกขยะจากการสังเกตและการจดจำลักษณะเด่นของพลาสติกชนิดต่าง ๆ บางชนิดก็มีสัญลักษณ์รีไซเคิลมาติดอยู่ ซึ่งทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถของผู้คัดแยก เพื่อช่วยให้การคัดแยกขยะพลาสติกง่ายขึ้น จึงมีการคิดค้นวิธีการคัดแยกพลาสติกขึ้นมาหลายวิธีตามคุณสมบัติของพอลิเมอร์ เพื่อให้สามารถคัดแยกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการนำเครื่องคัดแยกแรมมาประยุกต์ใช้ และพัฒนาจนกลายเป็นระบบคัดแยกแบบอัตโนมัติในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยสนใจศึกษาเครื่องคัดแยกชนิดพอลิเมอร์ของตัวอย่างบนสายพานลำเลียงโดยใช้เทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ ซึ่งเป็นเทคนิคนี้ไม่จำเป็นต้องเตรียมวัสดุสำหรับทดสอบสามารถทำการทดสอบได้ทุกชิ้นและรวดเร็วกว่าการใช้แรงงาน สามารถจำแนกขยะได้อย่างแม่นยำ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. สร้างเครื่องคัดแยกชนิดพลาสติกบนสายพานลำเลียงสำหรับทดลองในห้องปฏิบัติการ
2. สร้างสมการทำนายชนิดพลาสติกจากสเปกตรัมของชิ้นงานสำหรับการคัดแยกชนิดของขยะพลาสติกบนสายพานลำเลียงด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

1.3 แนวคิดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและสร้างเครื่องคัดแยกชนิดพลาสติกของตัวอย่างพลาสติกบนสายพานลำเลียงด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ เพื่อเป็นต้นแบบในการสร้างเครื่องสำหรับอุตสาหกรรม และเพื่อลดต้นทุนในการผลิตเครื่องคัดแยกชนิดดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดในการสร้างเครื่องคัดแยกขยะที่มีประสิทธิภาพโดยอาศัยอุปกรณ์วัดในช่วง 400-1000 nm ซึ่งมีต้นทุนไม่สูงมาก ทดแทนอุปกรณ์วัดอินฟราเรดย่านใกล้ในช่วง 900-1700 nm ที่ใช้ในปัจจุบัน จึงได้ทำการขึ้นรูปขยะจำลองที่มีความหลากหลายชนิดของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ หลากหลายสี หลากหลายความหนา และหลากหลายพื้นผิวที่ขรุขระเพื่อเป็นตัวแทนขยะที่ผ่านกระบวนการฝังกลบ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. พอลิเมอร์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นพอลิเมอร์บริสุทธิ์ และพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมสีมาแล้วซึ่งอาจมีการเติมสารอื่นๆ ลงไปเพื่อให้สามารถผสมสีแล้วคงรูปไว้ได้ เพื่อลดปัจจัยอื่นๆ เช่น การปนเปื้อนดิน เศษอาหารต่างๆ หรือสารเคมีอื่นๆ ที่ถูกทิ้งรวมกัน
2. ระบบที่เลือกใช้เป็นระบบเกรตติงแบบสองผ่านในช่วงความยาวคลื่น 400-1000 นาโนเมตร

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการทดลอง

1.5.3 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

ตอนที่ 1 ออกแบบเครื่องสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้บนสายพานลำเลียง และสร้างเครื่อง

1. ศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์ของเทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ แล้วเลือกระบบที่จะนำมาปรับใช้
2. คำนวณระยะห่าง และองศาของอุปกรณ์แต่ละชิ้น แล้วติดตั้งอุปกรณ์

3. เชื่อมต่อกล้องเข้ากับระบบคอมพิวเตอร์
4. ปรับเทียบความยาวคลื่น และรายละเอียดของภาพที่ได้

ตอนที่ 2 การขึ้นรูปพอลิเมอร์

1. ขึ้นรูปพอลิเมอร์ 5 ชนิด ทั้งพอลิเมอร์บริสุทธิ์ และพอลิเมอร์ผสมสีแล้ว ได้แก่ PET, HDPE, PP, PS และ PVC ด้วยเทคนิค Compression molding หนา 1, 3 และ 5 มิลลิเมตร
2. ตัดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1.5 เซนติเมตร
3. สำหรับตัวอย่างที่ต้องการความขรุขระของผิวจะใช้กระดาษทรายเบอร์ 80 และเบอร์ 220 มาขัดผิวเพื่อให้ผิวมีระดับความขรุขระต่างกัน
4. ทำการเปรียบเทียบความถูกต้องและแม่นยำของระบบการคัดแยก

ตอนที่ 3 การเก็บข้อมูลสเปกตรัม และการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองทำนาย

1. นำชิ้นพอลิเมอร์ตัวอย่างทั้งหมดมาวัดสเปกตรัมด้วยเครื่องที่สร้างขึ้น พร้อมทั้งวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง Multispectrometer เพื่อไว้เปรียบเทียบ
2. นำข้อมูลสเปกตรัมที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCA เพื่อสร้างแบบจำลองทำนาย
3. นำแบบจำลองทำนายที่ได้ มาทดสอบการทำนายชนิดพอลิเมอร์

1.5.4 วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย

1.5.5 นำเสนอผลงานวิจัย

1.5.6 จัดทำรายงานสรุปโครงการวิจัย

1.5.7 เสนอผลงานวิจัย

1.5.8 การสอบโครงการวิจัย

1.5.9 บทความวิจัย

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เครื่องคัดแยกชนิดพลาสติกบนสายพานลำเลียงขนาดสำหรับห้องทดลอง
2. ได้เครื่องต้นแบบที่ใช้ในการคัดแยกพลาสติกซึ่งสามารถนำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรมได้

บทที่ 2


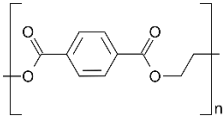

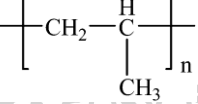


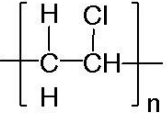
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปัญหาของขยะและวิธีการแยก

ขยะพลาสติกกำลังเป็นปัญหาในปัจจุบัน เนื่องด้วยสามารถผลิตได้ง่ายในปริมาณมาก มีความหลากหลายชนิดและรูปแบบ ซึ่งมีทั้งขยะที่มาจากครัวเรือนและอุตสาหกรรม สำหรับประเทศไทยนั้นมีปริมาณขยะพลาสติกคิดเป็น 12% ของปริมาณขยะทั้งหมด ซึ่งส่วนใหญ่จะมาจากถุงพลาสติก ชนิดหิ้ว ขวดพลาสติก โฟมบรรจุอาหารและแก้วพลาสติกแบบใช้ครั้งเดียวและบรรจุภัณฑ์อื่นๆ ดังตารางที่ 1 [3-5] เมื่อมีการจัดการขยะพลาสติกที่ไม่ถูกต้อง อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางบกและทางทะเล ดังเช่นในช่วงปี พ.ศ. 2560 เกิดปัญหาขยะพลาสติกลอยเกลื่อนบริเวณริมชายหาดท่องเที่ยวและการเกยตื้นของสัตว์ทะเลที่ตายจากการกินขยะพลาสติก ซึ่งสาเหตุส่วนมากมักเกิดจากการทิ้งขยะของชาวบ้านในชุมชน นักท่องเที่ยว ขยะจากโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงขยะที่ได้จากการประกอบอาชีพทางทะเล

เนื่องจากปริมาณขยะที่มีจำนวนมากและมีการปนเปื้อนสูง จึงได้มีการกำจัดขยะเหล่านี้ด้วยการนำไปฝังกลบเพื่อรอให้เกิดการย่อยสลายของสารอินทรีย์และนำมาเผาเพื่อกำจัดในภายหลัง แต่วิธีการเหล่านี้ ใช้เวลาและพื้นที่จำนวนมาก และอาจทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น ดังนั้นผู้คนจึงเริ่มสนใจในการนำขยะพลาสติกมาใช้ซ้ำหรือการนำไปรีไซเคิลเชิงเคมี เช่น การนำขยะพลาสติกไปเผาแบบไพโรไลซิสร่วมกับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากวิธีนี้จะมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้นและทำให้ปริมาณของโลหะหนักในเชื้อเพลิงเหลวลดลง [1] หรือการนำขยะพลาสติกและชีวมวลไปเผาแบบไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิง [6] หรือการนำพลาสติกผสมมาใช้ในการผลิตเป็นเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง เช่นการนำ HDPE, PP, PS และ ABS ที่มีสารเติมสารหน่วงไฟคือ Polybrominated Epoxy (ABS-Br) ผสมกับ PET และ PVC มาทำการเผาแบบไพโรไลซิส เพื่อให้ได้น้ำมันไพโรไลซิส โดยจากการทดลองพบว่าเมื่อเติม PET และ PVC จะทำให้น้ำมันไพโรไลซิสลดลง แต่จะทำให้ผลผลิตที่เป็นแก๊สเพิ่มขึ้น และเมื่อได้น้ำมันไพโรไลซิสมากกว่า 50% โดยน้ำหนัก จะพบว่ามีการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และสารที่เป็นอนุพันธ์ของเบนซีนเป็นองค์ประกอบด้วย [2]

ตารางที่ 1 พอลิเมอร์ 5 ชนิดและการนำไปประยุกต์ใช้งาน [7]

ชนิด	ชื่อเต็ม	หมายเลข	โครงสร้าง	การนำไปใช้
<i>PET</i>	Polyethylene terephthalate			ขวดบรรจุของเหลว เช่น น้ำดื่ม เครื่องดื่ม และน้ำมัน แผ่นฟิล์ม กระปุกใส
<i>HDPE</i>	High density polyethylene			ขวดนม บรรจุภัณฑ์สำหรับน้ำยาทำความสะอาด สบู่ สระผม แป้งเด็ก และถุงหิ้ว ขวดน้ำมันเครื่อง
<i>PP</i>	Polypropylene			ภาชนะบรรจุอาหาร เช่น กล่อง ซาม จาน ถัง ตะกร้า กระบอกใส่น้ำ แข็งแรง ขวดซอส แก้วโยเกิร์ต ขวดบรรจุ ชิ้นส่วนรถยนต์ ไม้กวาด พลาสติก แปร่ง
<i>PS</i>	Polystyrene			ใช้ทำภาชนะบรรจุของใช้ เช่น เทป เพลง สำลี หรือของแข็ง นอกจากนั้นยังนำมาทำโฟมใส อาหาร กล่องวิดีโอ ไม้บรรทัด กระเปาะเทอร์โมมิเตอร์ แผงสวิทช์ ไฟ ฉนวนความร้อน ถาดใส่ไข่
<i>PVC</i>	Polyvinylchloride			ท่อน้ำประปา สายยางใส แผ่นฟิล์ม สำหรับห่ออาหาร ม่านในห้อง อ่างน้ำ แผ่นกระเบื้องยาง แผ่นพลาสติกปูโต๊ะ ประตู หน้าต่าง วงกบ และหนังเทียม กรวยจราจร เฟอร์นิเจอร์ ม้านั่งพลาสติก ตลับ เทป เคเบิล แผ่นไม้เทียม

การนำพลาสติกเหล่านั้นมารีไซเคิล สามารถทำได้โดยการนำไปหลอมขึ้นรูปเพื่อนำมาใช้งานใหม่อีกครั้ง แต่การรีไซเคิลด้วยวิธีนี้ พลาสติกที่ใช้ควรเป็นพลาสติกชนิดเดียวกันมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้น เนื่องจากการนำขยะพลาสติกหลายชนิดที่ผสมปนกัน มาขึ้นรูปจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติต่างๆ ลดลงอย่างมาก นอกจากนี้ขยะพลาสติกที่ใช้ควรมีสีที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำการแยกชนิดพลาสติกก่อนที่จะนำไปใช้งาน และหากสามารถคัดแยกขยะพลาสติกให้มีความบริสุทธิ์สูง ก็จะทำให้สามารถนำกลับไปใช้งานได้ดียิ่งขึ้น อุตสาหกรรมการแยกขยะในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการคัดแยกพลาสติกผสมผ่านงานวิจัย ทดแทนการแยกโดยใช้แรงงาน ที่แยกขยะโดยการสังเกตและการจดจำลักษณะเด่นของพลาสติกชนิดต่าง ๆ เช่น

การคัดแยกพลาสติกโดยอาศัยไฟฟ้าสถิต เทคนิคนี้มักใช้ในการแยกชนิดพลาสติก 2 ชนิดที่ผสมอยู่ด้วยกัน เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์/พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลท โดยอาศัยการเสียดสีกันของพลาสติกทั้ง 2 ชนิดทำให้เกิดการถ่ายเทประจุทำให้พลาสติกชนิดหนึ่งเกิดประจุบวกและอีกชนิดหนึ่งเกิดประจุลบหรือยังคงเป็นกลางบริเวณผิว และแยกชนิดโดยอาศัยการเห (Reflection) ภายในสนามไฟฟ้า [8], [9]

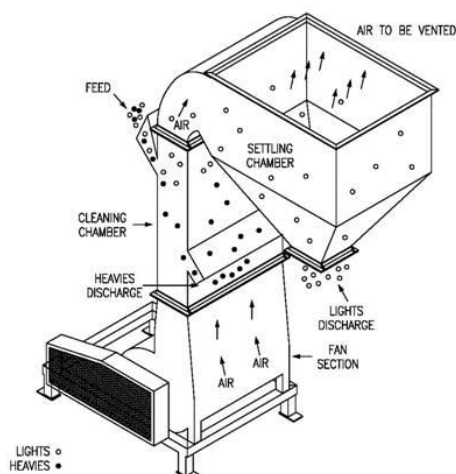
การคัดแยกชนิดพลาสติกโดยปรับสภาพพื้นผิวหรือที่เรียกว่า Froth Flotation โดยเทคนิคนี้ จะใช้แยกพลาสติก 2 ชนิดที่มีความหนาแน่นคล้ายกัน โดยเมื่อนำพลาสติกมาผสมอยู่ในสารตัวกลาง จะทำการปรับผิวหน้าของพลาสติกชนิดแรกให้มีสมบัติที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) โดยใช้สารที่ทำหน้าที่เป็น selective wetting เพื่อให้ผิวพลาสติกชนิดหนึ่งไม่ติดกับฟองก๊าซ ส่วนพลาสติกชนิดที่สองจะคงสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เพื่อให้พลาสติกสามารถเกาะติดกับฟองก๊าซและลอยอยู่ในสารตัวกลางได้ โดยฟองก๊าซจะส่งผลให้ความหนาแน่นโดยรวมลดลง จึงเกิดความแตกต่างของความหนาแน่นของพลาสติกทั้ง 2 ชนิด ทำให้แยกชนิดพลาสติกออกจากกันได้ [9]

การคัดแยกชนิดพลาสติกโดยอาศัยความหนาแน่นของแม่เหล็ก (Magnetic density separation: MDS) เทคนิคนี้จะใช้แม่เหล็กในรูปของเหลวที่ประกอบด้วยเหล็กออกไซด์เป็นตัวกลางในการแยก โดยความหนาแน่นของของเหลวจะสามารถกำหนดได้โดยใช้สนามแม่เหล็ก แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือไม่สามารถแยกพลาสติกที่มีความหนาแน่นคาบเกี่ยวกันได้ [9]

การคัดแยกโดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นของพลาสติกแต่ละชนิดซึ่งจะคัดแยกพลาสติกผสมออกเป็น 2 กลุ่ม ตามความเร็วของตัวกลางที่เป็นของไหล เช่น อากาศ น้ำ น้ำผสมเกลือ เป็นต้น มี 3 รูปแบบ

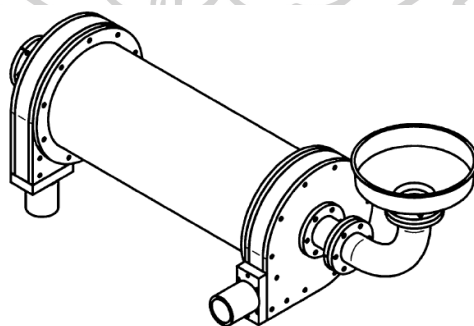
1. Pneumatic separation จะแยกชนิดพลาสติกตามน้ำหนักและขนาดโดยใช้ระบบอากาศที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางอัดส่งไปตามท่อลม โดยลักษณะของเครื่องจะมีขนาดใหญ่

ทำให้กินพื้นที่ในการใช้งาน เนื่องจากต้องอาศัยอุปกรณ์หลายตัวเพื่อใช้ในการสร้างลมอัด ดังภาพที่ 1 [10]



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบและการทำงานของ Pneumatic separator [10]

2. Centrifugal separation จะแยกชนิดพลาสติกโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากการหมุนรอบจุดหมุน วิธีนี้ถือว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการแยกที่ดี แต่พลาสติกจะต้องอยู่ในสภาพถูกบดละเอียดก่อน เพื่อเพิ่มคุณภาพผลิตภัณฑ์ และมีขั้นตอนการทำงานมากกว่า 1 ขั้นตอน โดยการบ้อนวัสดุนั้นสามารถบ้อนเข้าไปได้โดยตรงผ่านกระแสของอากาศโดยที่ไม่ต้องใช้ปั้มช่วยในการบ้อนสาร โดยทิศทางการไหลของวัสดุภายในจะไหลในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา โดยภาพที่ 2 แสดง Cylindrical Centrifugal Force Separator (CFS) [10]



ภาพที่ 2 Cylindrical Centrifugal Force Separator (CFS) [10]

3. Sink/float separation การทดสอบการจมลอยเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนแต่ต้องการตัวกลางที่มีความหนาแน่นอยู่ระหว่างพลาสติกที่ต้องการคัดแยกออกจากกัน ซึ่งน้ำธรรมดาจะสามารถคัดแยกได้แค่พลาสติกผสมที่มีความหนาแน่นมากกว่าหรือน้อยกว่า 1 g/cm^3 เท่านั้น ในกรณีอื่นจะเติมสารเติมแต่งลงในตัวกลาง เพื่อปรับค่าความหนาแน่นของ

ตัวกลางให้เหมาะสมกับช่วงความหนาแน่นที่ต้องการหรือนำสารละลายอื่นๆ มาประยุกต์ใช้ หรือการใช้กระบวนการทางกายภาพ เช่น การต้ม สำหรับพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นมากกว่า 1 g/cm^3 สามารถแยกได้โดยใช้เทคนิค เช่น shaking table, fluidized bed separation [9]

2.2 อินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared)

รังสีอินฟราเรดย่านใกล้ คือรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่จัดอยู่ในช่วงรังสีอินฟราเรด โดยช่วงคลื่นอินฟราเรดถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วงย่อยตามความยาวคลื่น ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ช่วงของรังสีอินฟราเรด [5, 7]

ช่วง	ความยาวคลื่น (nm)	เลขคลื่น (cm^{-1})	ย่านอันตรกิริยา
อินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared, NIR)	750-2,500	13,333-4000	โอเวอร์โทน, คอมบิเนชัน
อินฟราเรดย่านกลาง (Mid IR)	2,500-25,000	4,000-400	การสั่นแบบพื้นฐาน
อินฟราเรดย่านไกล (Far IR)	25,000-100,000	400-10	การหมุน

ในบางกรณีอาจมีการแบ่งช่วงความยาวคลื่นที่เฉพาะเจาะจงกับการใช้งาน เช่น ช่วง 600-2,500 nm เรียกว่า Far-Infrared-Visible spectroscopy หรือ overtone vibrational spectroscopy ช่วง 600-1,100 nm เรียกว่า Short-Wavelength Near-Infrared Region (SW-NIR) เป็นต้น

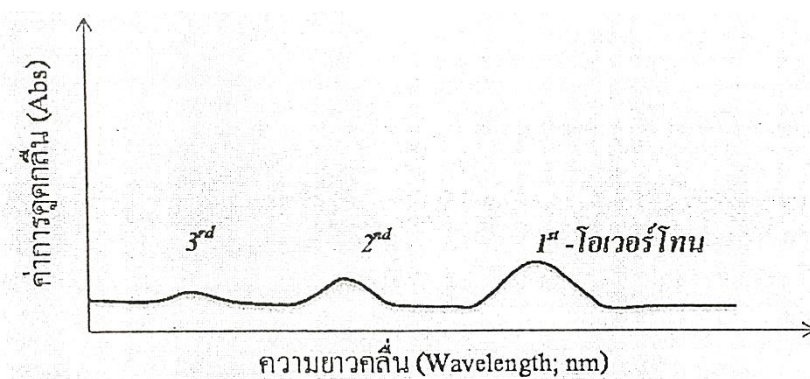
2.2.1 หลักการของสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

กระบวนการการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ โมเลกุลที่สามารถดูดกลืนรังสีในช่วงนี้ได้ต้องมีลักษณะสำคัญดังนี้ [5, 7]

1. สารที่โมเลกุลประกอบด้วยพันธะไฮโดรเจน (X-H) โดยที่ X คือ คาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ เป็นต้น
2. ควรมีสมบัติผ่านตามกฎการเลือก (Selection Rule)
3. โมเลกุลเกิดการสั่นแบบโอเวอร์โทน (Overtone Vibration) การสั่นแบบนี้เกิดจากโมเลกุลดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้เข้าไปทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานการสั่นจากระดับพื้น ($v = 0$) ไปยังสถานะกระตุ้นมากกว่าเท่าตัว ($v = 2, 3, \dots$) พิกที่ได้จะเรียกว่าแถบโอเวอร์โทนซึ่งมีลักษณะความเข้มที่ต่ำกว่า โดยการกระตุ้นจากระดับที่ 0 ไประดับที่ 2 จะเรียกว่าโอเวอร์โทนอันดับ 1 (First Overtone) การกระตุ้นจากระดับที่ 0 ไประดับที่ 3 จะเรียกว่าโอเวอร์โทนอันดับ 2 (Second Overtone) ส่วนการกระตุ้นจากระดับที่ 0

ไประดับที่ 4 จะเรียกว่าโอเวอร์โทนอันดับ 3 (Third Overtone) โดยยิ่งอันดับโอเวอร์โทนมากขึ้น แถบโอเวอร์โทนจะมีความเข้มลดลงดังภาพที่ 3

4. โมเลกุลเกิดการสั่นแบบคอมบิเนชัน (Combination Vibration) เป็นการสั่นแบบรวม เกิดจากการที่โมเลกุลหนึ่งๆเกิดการสั่นได้หลายชนิดในเวลาเดียวกัน บางครั้งการสั่นที่ต่างชนิดกันเกิดการรวมกันได้ จึงเกิดเป็นแถบคอมบิเนชันขึ้น



ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนในแถบโอเวอร์โทนอันดับต่างๆ [5, 7]

กระบวนการการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้เริ่มจาก เมื่อรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ส่องผ่านเข้าไปยังสารหรือวัสดุที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ได้ ตัวสารหรือวัสดุจะเกิดการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ ทำให้โมเลกุลของสารเกิดการสั่นที่ความถี่สูง โดยการสั่นของพันธะต่างๆจะเกิดที่ช่วงความยาวคลื่นที่ต่างไปตามแต่ละหมู่ฟังก์ชัน เมื่อโมเลกุลได้รับรังสีอินฟราเรดย่านใกล้และเกิดอันตรกิริยากัน รังสีอินฟราเรดย่านใกล้จะดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นตรงกับพันธะในโมเลกุล จะทำให้เกิดการสั่นในสถานะกระตุ้นในระดับโอเวอร์โทนหรือคอมบิเนชัน แต่โมเลกุลไม่สามารถอยู่ในสถานะกระตุ้นได้จึงต้องได้จึงต้องคายพลังงานออกมาในรูปความร้อนเพื่อให้อกลับคือสู่การสั่นในสถานะพื้นตามเดิม ซึ่งเป็นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert) กล่าวคือพลังงานของคลื่นแสงเมื่อผ่านเข้าไปในตัวอย่างจะถูกดูดกลืนไว้โดยองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง ความเข้มของแสงที่ผ่านออกมาโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีนั้น โดยความเข้มของแถบการดูดกลืนในสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้มักจะแสดงในรูปค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) เป็นแกนตั้งและความยาวคลื่น (Wavelength) เป็นแกนนอนดังภาพที่ 3 [7] โดยค่าความยาวคลื่นขององค์ประกอบต่างๆ ที่ปรากฏในแถบสเปกตรัม NIR สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เลขคลื่นและความยาวคลื่นของคัมภ์ประกอบต่างๆ ของพอลิเมอร์ 5 ชนิดที่ปรากฏในแถบสเปกตรัม NIR

Bond vibration in wavenumber (cm ⁻¹)	HDPE	PP	PS	PET	PVC
C-H stretching	3000-2840	3000-2840	3000-2840	3000-2840	3000-2840
C-H bending aromatic compound			2000-1650		
C=O stretching carboxylic acid					1720-1706
C=C stretching alkene vinylidene				1658-1648	
C=C stretching conjugated alkene			1650-1600		
C=C stretching cyclic alkene			1650-1566		
C-H bending alkane methylene gr.	1465			1465	1465
C-H bending alkane methyl gr.		1375, 1450			
C-O stretching ester					1210-1163
C-H bending alkene mono substituted		995-985 915-905			
C=C bending alkene (trans)					980-960
C-Cl stretching					850-550
C-H bending 1,2,3-tri substituted				780±20	
C=C bending alkene (cis)				730-665	
C-H bending 1,2,3-tri substituted	780±20				780±20

Bond vibration in wavelength (nm)	HDPE	PP	PS	PET	PVC
C-H stretching. 4 th overtone Benzene			713	713	
C-H stretching. 4 th overtone CH ₃		740			
C-H stretching. 4 th overtone CH ₂	746	746	746	746	746
C-H stretching. 4 th overtone CH ₂	762	762	762	762	762
3×C-H stretching + 2×C-C stretching	840	840	840	840	840
C-H stretching 3 rd overtone benzene			874	874	
C-H stretching 3 rd overtone CH ₃		900			
C-H stretching 3 rd overtone CH ₂	913	913	913	913	913
C-H stretching 3 rd overtone CH ₂	938	938	938	938	938

2.2.2 อินฟราเรดย่านใกล้ Near-infrared (NIR) spectrometry

Near-infrared (NIR) spectrometry หรือ เครื่องสเปกโตรมิเตอร์อินฟราเรดย่านใกล้ เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบข้อมูลสเปกตรัมของอาหาร และวัสดุอื่นๆ ซึ่งตรวจสอบได้ทั้งเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพ โดย เครื่องสเปกโตรมิเตอร์อินฟราเรดย่านใกล้เป็นที่นิยมเนื่องจากข้อดีหลายประการ กล่าวคือ วิเคราะห์ผลได้รวดเร็ว เตรียมตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบง่ายหรือนำตัวอย่างมาทดสอบได้โดยไม่ต้องเตรียมเลย ใช้ข้อมูลที่ได้ในการสแกนเพียงครั้งเดียวไปวิเคราะห์ผลได้หลายอย่าง และไม่ทำให้ตัวอย่างเสียหาย อย่างไรก็ตามก็มีข้อด้อยอยู่บ้าง อาทิเช่น ต้องมีการวัดสเปกตรัมจากตัวอย่างที่รู้

ปริมาณหรือคุณภาพสารแน่นอนเพื่อนำมาเปรียบเทียบ อุปกรณ์วัดมีราคาแพงและใช้กระบวนการอ้างอิงที่ซับซ้อน และต้องใช้ผู้ที่มีความชำนาญในด้านการวิเคราะห์ค่าทางเคมีอย่างละเอียด ในปัจจุบันนี้การทำทดสอบทางเคมีในห้องปฏิบัติการมีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นและใช้เวลานาน จึงมีการนำเครื่องสเปกโตรมิเตอร์อินฟราเรดย่านใกล้นี้เข้ามาใช้งาน เพื่อลดค่าใช้จ่ายและเวลาที่เสียไป ซึ่งเป็นประโยชน์มากในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอาหาร [11]

เครื่องมืออินฟราเรดเชิงพาณิชย์ (Commercial infrared instrument) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท [12, 13]

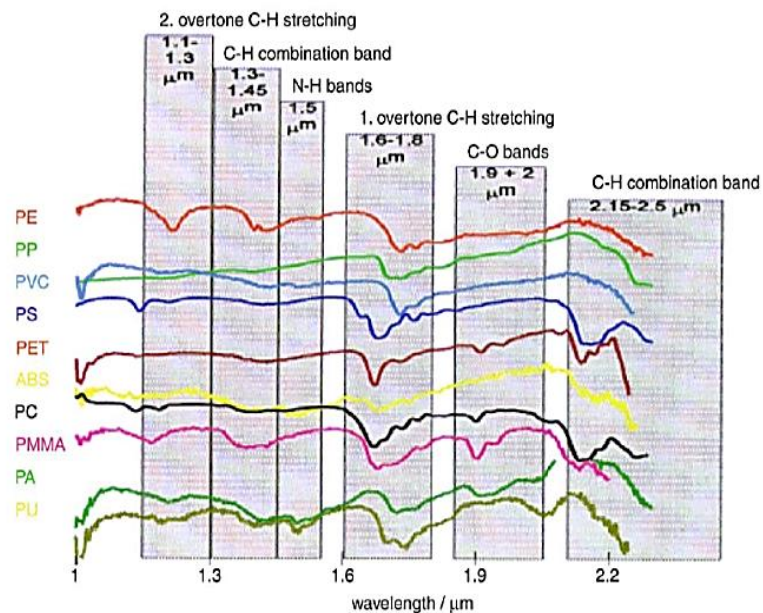
1. Laboratory analyzers คือ แบบใช้ในห้องแล็บเพื่อการวิจัย นิยมใช้ในการวิจัย และพัฒนา การควบคุมคุณภาพ ใช้ในกระบวนการควบคุมของโรงงานผลิตอาหาร หรือในห้องแล็บสถานศึกษา เพราะสามารถใช้ได้ง่าย ใส ไม่ต้องมีสารตั้งต้น ใช้งานได้หลายอย่าง และเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบได้ง่าย หรือไม่ต้องเตรียมเลย ดังเช่นเครื่อง MPA (Bruker) เป็นต้น
2. Process analyzer คือ แบบที่ใช้ในกระบวนการผลิต ที่ต้องสามารถทนต่อสภาวะรุนแรง นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในกระบวนการผลิตอาหาร ที่ต้องการการควบคุมคุณภาพแบบ online โดยออกแบบให้ทนทาน พกพาได้ และมีประสิทธิภาพสูง สามารถใช้งานแบบเฉพาะเจาะจงในสายการผลิตได้ และสามารถวิเคราะห์ ณ เวลานั้นๆ (real time) ได้

โดยปกติแล้ว เครื่องสเปกโตรมิเตอร์จะประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนแหล่งกำเนิดแสง นิยมใช้ Quartz-halogen lamps เป็นอันดับหนึ่ง รองลงมาคือกลุ่ม Light-emitting diodes (LED) ส่วนระบบแยกแสง ซึ่งมีหลายแบบ อาทิเช่น photodiode arrays (PDA), diode array detectors (DAD), laser diodes (LD), fixed filters (FF), wedge interference filters (WIF), tilting filters (TF), acousto-optical tunable filters (AOTF), liquid crystal tunable filters (LCTF), prism, gratings, fourier transform NIR (FT-NIR) เป็นต้น ส่วนสุดท้ายคือตัวตรวจจับ (sensor) โดยที่นิยมมาก คือ lead sulfide (PbS), indium gallium arsenide (InGaAs, 900-2500 nm) และ silicon-based devices ที่ใช้งานเฉพาะในช่วง UV ถึง short-wavelength NIR (200-1,000 nm)

2.3 การใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการจำแนกขยะพลาสติก

เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง โดยมีการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นครั้งแรกช่วงปี 1950 ในการทดสอบผลผลิตทางการเกษตรที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ในปัจจุบันมีบริษัทเครื่องมือและบริษัทผลิตเครื่องจักรอัตโนมัติมากมายที่ผลิตเครื่อง NIR สำหรับการตรวจสอบกระบวนการแบบ real-time ในอุตสาหกรรมเคมี อาหาร เยื่อ

กระดาษและพลาสติก โดยเครื่องมือนี้สามารถบันทึกค่าความยาวคลื่นที่ส่องผ่านหรือสะท้อนจากตัวอย่างและแสดงผลได้ ยกตัวอย่างเช่น เปอร์เซ็นต์ความชื้นในการตรวจสอบแบบออนไลน์ เป็นต้น [14] โดยในปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้มาใช้งานกับการจำแนกชนิดของขยะพลาสติกมากขึ้น โดยหลักการการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการจำแนกชนิดของขยะพลาสติกนั้น ต้องอาศัยการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีอินฟราเรดย่านใกล้กับวัสดุหรือสารที่ต้องการจะวิเคราะห์ โดยต้องเป็นสารที่ประกอบไปด้วยพันธะของไฮโดรเจน (X-H โดยที่ X คือ อะตอม C, O, N, S และอื่นๆ) ซึ่งส่วนมากพอลิเมอร์จะประกอบไปด้วยโครงสร้างที่เป็น C-H เป็นหลัก โดยอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นคือการที่โมเลกุลดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ในแต่ละช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกัน ทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นแบบโอเวอร์โทนหรือการสั่นแบบคอมบิเนชันและมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากการสั่นแบบสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นแบบข้ามชั้น โดยการตรวจวัดพลังงานทำได้หลายรูปแบบเช่นการวัดแบบสะท้อน (Reflectance) หรือการวัดแบบส่องผ่าน (Transmittance) เป็นต้น โดยระดับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของสารหรือวัสดุที่มีความยาวคลื่นต่างๆ จะปรากฏในรูปของสเปกตรัมที่มีแกนนอนเป็นค่าความยาวคลื่นและแกนตั้งเป็นค่าการดูดกลืนแสง หลังจากนั้นนำสเปกตรัมที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยวิธีที่ทำให้ได้ค่ามาตรฐานจะทำให้ได้สมการเทียบมาตรฐาน (Calibration Equation) ออกมา [7] โดยภาพที่ 4 แสดงสเปกตรัม NIR ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในช่วง 1000-2500 nm

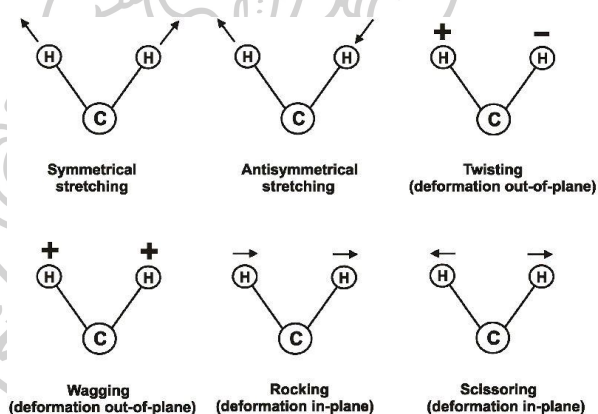


ภาพที่ 4 สเปกตรัมของพลาสติกแต่ละชนิด [14]

2.3.1 ข้อแตกต่างของเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้และสเปกโทรอินฟราเรดย่านกลาง

ทั้งสองเทคนิคที่กล่าวมานี้จะอาศัยการสั่นของโมเลกุลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีเหมือนกัน แต่เทคนิคสเปกโทรอินฟราเรดย่านกลางนั้นเมื่อสารหรือโมเลกุลได้รับรังสีอินฟราเรดย่านกลางที่มีความยาวคลื่นตรงกับพันธะในโมเลกุล จะทำให้เกิดการสั่นแบบพื้นฐานของโมเลกุลซึ่งแบ่งได้เป็น 2 แบบ [7] ดังภาพที่ 5 ได้แก่

1. การสั่นแบบยืด (Stretching) การสั่นแบบนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวพันธะระหว่างอะตอม โดยแบ่งได้อีก 2 แบบย่อย ได้แก่ แบบสมมาตร (Symmetric Stretching) และแบบไม่สมมาตร (Asymmetric Stretching)
2. การสั่นแบบงอ (Bending) การสั่นแบบนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของมุมพันธะ ซึ่งแบ่งได้อีก 2 แบบย่อย คือการงอในระนาบ ได้แก่ การงอแบบกรรไกร (Scissoring) และการงอแบบโยก (Rocking) และการงอนอกระนาบ ได้แก่ การงอแบบกระดิก (Wagging) และการงอแบบบิด (Twisting)



ภาพที่ 5 การสั่นแบบพื้นฐานแต่ละแบบ [15]

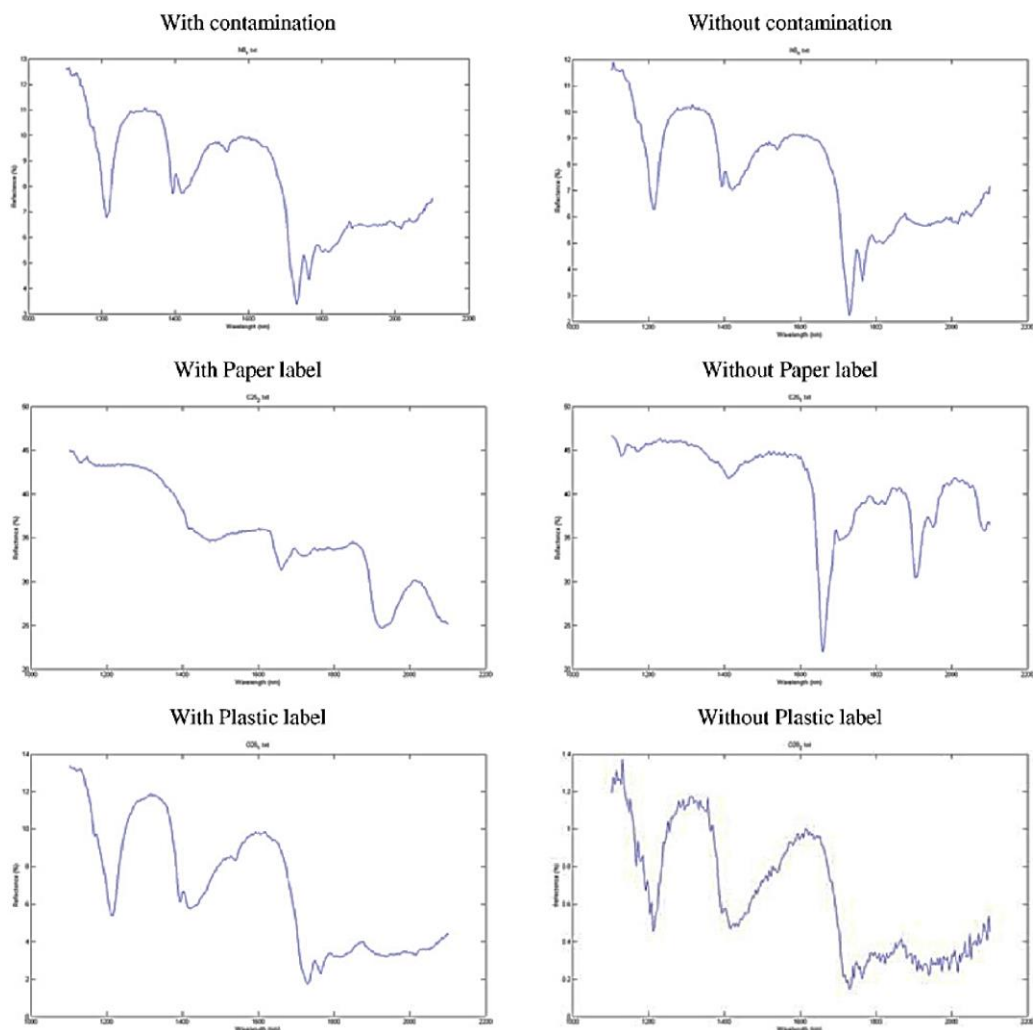
นอกจากเกิดการสั่นแบบพื้นฐานแล้วนั้น ต้องมีการเกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ของโมเลกุลร่วมด้วย (Dipole Moment) ซึ่งจะเรียกว่าโมเลกุลเหล่านี้ว่า IR-Active จึงจะทำให้เห็นสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงปรากฏออกมา ส่วนโมเลกุลที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่จะเรียกว่า IR-Inactive โดยเครื่องมือที่อาศัยการดูดกลืนแสงของสารในช่วง Mid-IR เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์หาชนิดหรือปริมาณสารจะเรียกว่า Infrared Spectrophotometer ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาโดยใช้ระบบทางเดินแสงแบบ Interferometer ซึ่งจะเรียกเครื่องนี้ว่า Fourier Transform Infrared Spectrophotometer [5, 7]

เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้เป็นเทคนิคประเภทพหุติยภูมิ ซึ่งแตกต่างจากสเปกโตรอินฟราเรดย่านกลางที่สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันเกิดขึ้นจำเพาะเจาะจง ทำให้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้จำเป็นต้องเก็บข้อมูลสเปกตรัมและค่าทางเคมีที่แม่นยำของตัวอย่างที่ต้องการใช้ตรวจสอบก่อน เพื่อใช้หาความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างสเปกตรัมกับค่าทางเคมีที่เชื่อถือได้ หลังจากนั้นจึงนำเอาแบบจำลองทำนาย (Prediction model) ไปใส่ในโปรแกรมที่ใช้ตัดแยก หรือทำนายค่าทางเคมีของตัวอย่างไม่ทราบค่า (Unknown) โดยการบันทึกสเปกตรัมของตัวอย่าง แล้วใช้แบบจำลองทำนายเพื่อทำนายว่าเป็นตัวอย่างอะไร และมีค่าทางเคมีเท่าไร โดยตารางที่ 4 แสดงข้อดีและข้อเสียของทั้ง 2 เทคนิคจากตารางที่ 4 สาเหตุที่เลือกใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการจำแนกชนิดขยะพลาสติก เนื่องจาก

1. ส่วนมากโครงสร้างหลักของพอลิเมอร์จะมีลักษณะเป็นสายโซ่คาร์บอนที่ประกอบไปด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นหลัก โดยอาจมีหมู่อะมิโน (-NH) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บ้างตามแต่ละชนิดของพอลิเมอร์ ซึ่งรังสีอินฟราเรดย่านใกล้จะมีการเกิดอันตรกิริยากับสารประกอบที่มีพันธะไฮโดรเจน ดังนั้นวิธีนี้จึงสามารถใช้หาหมู่ฟังก์ชันของโครงสร้างพอลิเมอร์ เพื่อใช้ในการจำแนกพลาสติกได้ รวมถึงสามารถวิเคราะห์ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันได้อีกด้วย [5, 7]
2. พลาสติกหลายชนิดมักมีการเติมสารเติมแต่งต่างๆ เช่น สี พลาสติกไซเซอร์ หรือสารเพิ่มความเสถียรทางความร้อน เป็นต้น ซึ่งสารเติมแต่งนั้นไม่มีผลต่อสเปกตรัม NIR เมื่อเปรียบเทียบกับ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรอินฟราเรดย่านกลาง (Mid-IR) ที่สเปกตรัมนั้นจะปรากฏพีคของสารเติมแต่งร่วมด้วย ดังนั้นเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้จึงง่ายต่อการวิเคราะห์สเปกตรัมเพื่อแยกชนิดของพลาสติกมากกว่า [16, 17]

ในกรณีที่เป็นขยะพลาสติกนั้นอาจมีสิ่งเจือปนต่างๆเข้ามาด้วย รวมถึงฉลากพลาสติกที่ติดมากับขวดน้ำ สิ่งเหล่านี้ไม่มีผลต่อสเปกตรัม NIR [17] โดยยืนยันได้จากงานวิจัยของ Y. Tachwali และคณะ [18] โดยเมื่อสเปกตรัม NIR ของขวดพลาสติก 3 แบบ ได้แก่แบบที่มีการปนเปื้อน แบบที่มีฉลากกระดาษ และแบบที่มีฉลากพลาสติกติดอยู่นำมาเปรียบเทียบกับสเปกตรัม NIR ของขวดพลาสติกเปล่า พบว่าสเปกตรัมของขวดที่มีการปนเปื้อนและขวดที่มีฉลากพลาสติกนั้นแทบไม่ต่างจากสเปกตรัมของขวดพลาสติกเปล่า แต่สำหรับสเปกตรัมขวดที่ติดฉลากแบบกระดาษนั้นสเปกตรัมที่ได้จะมีพีคที่ความเข้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของขวดเปล่า ดังภาพที่ 6 แต่ทั้งหมดนี้ไม่มีผลต่อการเลื่อนของพีค

ในสเปกตรัม เนื่องจากสเปกตรัมเฉลี่ยของขวดเปล่าที่มีอิทธิพลมากกว่าสิ่งปนเปื้อนและฉลาก



ภาพที่ 6 ของสารปนเปื้อน ฉลากกระดาษและฉลากพลาสติกที่ส่งผลต่อความเข้มของสเปกตรัม

3. สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่ต้องการทราบได้ไว เพื่อแค่ป้อนข้อมูลของสเปกตรัม NIR ที่ต้องการทราบเข้าไปในสมการที่เทียบมาตรฐานไว้แล้ว ดังนั้นจึงไม่ต้องผ่านกระบวนการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานอีก นอกจากนี้วิธีนี้ทำให้สารตัวอย่างไม่ถูกทำลาย [5, 7]

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้และสเปกโทรอินฟราเรดย่านกลาง [2, 16, 17]

สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR)	สเปกโทรอินฟราเรดย่านกลาง (Mid-IR)
ข้อดี	
สารเติมแต่งประเภทสี, สารปนเปื้อนหรือฉลากพลาสติกต่างๆไม่มีผลต่อสเปกตรัม NIR ส่วนสีดำนั้นสามารถดูดกลืนได้ดีในช่วงความยาวคลื่น NIR ดังนั้นสเปกตรัมที่ได้แทบจะไม่ปรากฏเลย	สามารถใช้พิสูจน์เอกลักษณ์ของหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์โดยใช้แถบการดูดกลืนในสเปกตรัม
มีความไวต่ออุปกรณ์ตรวจจับรังสี (Photoconductive Detectors) มากกว่า Mid-IR	สเปกตรัม Mid-IR สามารถใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของโครงสร้างได้ๆ
ใช้ศึกษาแรงกระทำระหว่างตัวถูกละลายและตัวทำละลายได้ โดยอาจใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย	สเปกตรัม Mid-IR ของสารเติมแต่ง จะแยกออกมาอย่างชัดเจนจากพีคอื่นๆ ซึ่งสามารถใช้ในการหาปริมาณองค์ประกอบของสารเติมแต่งได้
สามารถใช้แก้วและควอตซ์ในการส่องผ่านรังสี NIR แทนเซลล์วินโดวส์, เลนส์ปรับโฟกัสและสายไฟเบอร์ออปติก ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนของวัสดุได้	ข้อมูลที่ใช้ในการเทียบมาตรฐานมีความหลากหลายมากกว่าใน NIR และสามารถโอนถ่ายข้อมูลจากเครื่องมือหนึ่งไปอีกเครื่องมือหนึ่งได้ง่ายกว่า
ข้อเสีย	
แถบการดูดกลืนของสเปกตรัม NIR จะมีความเข้มข้นน้อยกว่าแถบสเปกตรัม Mid-IR เป็นผลมาจากการสิ้นแบบโอเวอร์โทนและคอมบิเนชันทำให้ได้แถบของการดูดกลืนแสงหลายแถบ ซึ่งทำให้ได้สเปกตรัมที่ยากต่อการวิเคราะห์	การแผ่รังสีของวัสดุดำมีผลต่อการดูดกลืนรังสี Mid-IR จะทำให้มีพลังงานลดลงอย่างมีนัยสำคัญกับความยาวคลื่น
ต้องมีการเก็บข้อมูลทางเคมีที่ต้องการใช้ตรวจสอบก่อนเพื่อใช้ในการทำการเทียบมาตรฐาน	วัสดุที่ใช้ในการส่องผ่านรังสี Mid-IR นั้นมีราคาแพงและบางชนิดไม่ทนต่อสารเคมี
ไม่สามารถโอนถ่ายข้อมูลจากเครื่องมือหนึ่งไปอีกเครื่องมือหนึ่งได้	วัสดุส่วนใหญ่มักจะดูดซับรังสี Mid-IR เพราะฉะนั้นความยาวของสารตัวอย่าง (path lengths) ต้องสั้นมากๆ ส่วนใหญ่จะให้มีความยาวอยู่ที่ 10-100 μm

เทคนิค Light Induce Plasma Spectroscopy (LIPS) [5] มีอุปกรณ์ที่สามารถใช้เป็นส่วนประกอบในเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในการระบุชนิดของพอลิเมอร์ ทำนายชิ้นงานสีที่บดได้ไม่แม่นยำ เลเซอร์ที่ใช้ในการกำเนิด Plasma คือ ชุดเลเซอร์ Nd:YAG วิธีการนี้ได้รับการพัฒนาให้มีการตอบสนองแบบทันที (90-99%) ในการจำแนกกลุ่มพลาสติกที่แตกต่างกันโดยวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติ เทคนิคนี้มีศักยภาพที่ยอดเยี่ยมสำหรับการวิเคราะห์แบบ online และ real time การใช้เลเซอร์ชนิด Nd:YAG มีข้อดีคือหาได้ง่าย ใช้งานง่าย ให้ประสิทธิภาพสูง ค่าใช้จ่ายน้อย และมีความเหมาะสมในการใช้ระบุชนิด เหมาะสำหรับการใช้ระบุชนิดพลาสติก โดยใช้แสงความยาวคลื่นในช่วง 230-310 nm และ 200-800 nm

2.3.2 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่อง NIR[13]

แหล่งกำเนิดรังสี (Radiation source)

แบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ คือ Continuum sources ที่ปล่อยแสงค่อนข้างคงที่และให้ความเข้มแสงที่ต่อเนื่องในช่วงความยาวคลื่นที่กว้าง และ Line sources จะปล่อยแสงแบบความยาวคลื่นไม่ต่อเนื่อง ส่วนความเข้มแสงก็จะขึ้นอยู่กับช่วงความยาวคลื่นของวัสดุที่ให้กำเนิดแสง โดยเทคนิค NIR จะใช้ quartz halogen lamps จัดเป็นแหล่งกำเนิดแสงประเภท Continuum ประกอบด้วยหลอดทั้งสแตนเลสและไอโอดีนในกระเปาะควอตซ์เป็นแหล่งกำเนิดรังสี แต่ quartz halogen lamps ก็มีข้อเสียตรงที่สร้างความร้อนออกมาในปริมาณมาก มีอายุการใช้งานสั้น และมีการเลื่อนของแถบสเปกตรัม (drift)

อุปกรณ์เลือกความยาวคลื่น (Wavelength selection devices)

ฟิลเตอร์ ที่นำมาใช้ในเครื่อง NIR แบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ คือ optical interference filters ที่ประกอบด้วยฟิล์มที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าหลายๆ ชั้นที่มีคุณสมบัติในการสะท้อนแสงต่างกัน ซึ่งเป็นตัวเลือกที่มีราคาสูง และ electronically tunable filters สามารถควบคุมการส่องผ่านของสเปกตรัมได้โดยการปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า คลื่นความถี่ และค่าอื่นๆ ซึ่ง 2 แบบที่นำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย คือ liquid crystal tunable filters (LCTF) ที่ประกอบด้วยชั้นของ polarizers แผ่น liquid crystal ที่สามารถปรับความต้านทานได้ ส่วนอีกชนิดหนึ่ง คือ Acousto-optical tunable filters (AOTF) ใช้คลื่นความถี่วิทยุ แยกความยาวคลื่นออกมา เป็นความยาวคลื่นเดี่ยวจากความยาวคลื่นทั้งหมดที่ผ่านคริสตัล

โมโนโครมาเตอร์ เป็นอุปกรณ์เลือกความยาวคลื่นที่ต้องการ ภายในจะมีระบบกระจายแสง ออกเป็นความยาวคลื่นต่าง ๆ และใช้การสะท้อนของกระจกโค้งและสลิตเพื่อเลือกแสงความยาวคลื่นที่ต้องการ

ปริซึม มักจะถูกใช้ใน แผ่นซิลิกาสำหรับเครื่อง visible และ NIR โดยปริซึมทำมาจาก NaCl หรือ KBr ข้อเสียหลักของปริซึม คือ สามารถใช้งานได้ในช่วงความยาวคลื่นที่จำกัด ซึ่งในปัจจุบันจะแทนที่ปริซึมด้วย diffraction gratings หรือ interferometer ในระบบ Fourier transform

เกรตติง (Diffraction grating) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กระจายแสงหรือแยกรังสีแสงออกเป็นช่วงตามความยาวคลื่นเมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านร่องขนาดเล็ก โดยแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันก็จะถูกสะท้อนออกมาในมุมที่ต่างกัน ขนาดของร่องที่ใช้ในงานในช่วงแสงอินฟราเรดจะอยู่ที่ 50-200 ร่องต่อ มม. โดยประสิทธิภาพในการกระจายแสงส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างร่องที่ติดกันและมุมของร่อง ซึ่ง diffraction grating นี้มีข้อเสียที่ว่า แสงที่คนละความยาวคลื่นอาจถูกสะท้อนออกมาในมุมเดียวกันได้ ซึ่งสามารถลดปัญหานี้ได้โดยใช้ cut-off filters ช่วยกำจัดความยาวคลื่นที่ไม่ต้องการออก Diffraction grating นี้ยังแบ่งได้สองแบบคือ แบบสะท้อน (Deflection) และแบบส่องผ่าน (Transmission)

Interferometer คิดค้นและประดิษฐ์โดย Albert Abraham Michelson ในการทดลอง Michelson-Morley ซึ่งภายใน Interferometer เป็นการทำงานร่วมกันของ interferograms กับ กระจกเคลื่อนที่ ทำให้สามารถเลือกช่วงคลื่นได้ตามเลขคลื่นที่เป็นไปตามหลักของ fourier transform สำหรับเครื่องที่ใช้เทคนิคนี้จะเรียกว่า **FT-NIR** แสงเดินทางผ่านตัวอย่าง สารอ้างอิง กระจกเคลื่อนที่ เกิดเป็น Interferograms แล้วนำไปคำนวณหาปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนของตัวอย่าง พลังงานแสงที่ได้จาก Interferometer มีความเข้มมากกว่าแบบเกรตติง และไม่เกิดการรบกวนของแสงเลขคลื่นอื่น

อุปกรณ์ตรวจจับ (Detectors)

อุปกรณ์ตรวจจับเป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาให้ทำหน้าที่วัดความเข้มของแสงอินฟราเรดโดยเปลี่ยนพลังงานรังสีเป็นสัญญาณไฟฟ้า ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจจับขึ้นอยู่กับหลายๆ ปัจจัย รวมถึงความไวในการตอบสนอง การตอบสนองต่อแสงสเปกตรัม ขอบเขตที่ตรวจจับได้ และอุณหภูมิในการทำงาน การเลือกใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับขึ้นอยู่กับช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการวัด ซึ่งสามารถใช้ในรูปแบบของไดโอด (สำหรับการวัดเพียง 1 จุด) เป็นเส้นตรง (1D array) หรือเป็นภาพ (2D Array) ขึ้นอยู่กับการใช้ประโยชน์ใช้งาน ในงานวิจัยนี้ต้องการวัดค่าสเปกตรัมบนสายพานลำเลียงจำเป็นต้องถ่ายภาพสเปกตรัมบนสายพาน (Line scan) นำแสงที่สะท้อนออกจากตัวอย่างมาทำการแยกแสงและตรวจวัดด้วยกล้อง (2D Array) ราคาและช่วงคลื่นที่สามารถตรวจจับจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำ อาทิเช่น

indium gallium arsenide (InGaAs, 900-2500 nm) และ silicon-based devices (200-1,000 nm)

ซอฟต์แวร์ (Software)

โดยปกติเครื่อง NIR ของแต่ละบริษัทก็จะมีซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมาเอง เนื่องจากสามารถใช้งานแบบปฐมภูมิได้แล้ว ยังสามารถใช้งานแบบหุดิยภูมิได้ด้วย ซึ่งแต่ละบริษัทก็จะมีฐานข้อมูล หรือชุดข้อมูลเป็นของตนเอง และแต่ละบริษัทก็มีรายละเอียดด้านเทคโนโลยีที่แตกต่างกันออกไป จึงไม่สามารถนำมาใช้ร่วมกันได้ ดังเช่น ในห้องปฏิบัติการนี้ใช้เครื่องวัด Multispectrometer (Tec5) และ นำสเปกตรัมไปวิเคราะห์บนโปรแกรม Unscrambler (Camo) ในขณะที่เครื่องวัด MPA (FT-NIR ของบริษัท Bruker) ทำการวัดและวิเคราะห์บนโปรแกรม Opus



2.3.3 อัลกอริทึมของการวิเคราะห์แบบ Principle Component Analysis (PCA)

สมการทั่วไปของการวิเคราะห์แบบ Principle Component Analysis (PCA) ใช้สำหรับการแยกกลุ่มตัวอย่างจากสเปกตรัม โดยการหาเมตริกซ์พื้นฐานที่ต่างกันของแต่ละตัวอย่างเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ (ค่าโหนดดิง) ที่คูณกับสเปกตรัมและให้ค่าคะแนน PCA ที่แยกกลุ่มอย่างชัดเจนโดยไม่ต้องอาศัยค่าทางเคมีในการวิเคราะห์

สามารถเขียนสมการได้ดังสมการด้านล่างนี้ โดยที่ X คือ สเปกตรัมที่วัดได้ PC ค่าคะแนน PCA หรือ คะแนนรวมของทุกตัวอย่าง L คือเมตริกซ์โหนดดิงเพื่อใช้ในการหาค่าคะแนน PCA และค่า E ค่าความผิดพลาดเมื่อลบจากค่าคะแนน PC ทั้งหมด

$$X = PC \cdot L^T + E \quad (1)$$

หากพิจารณาค่าเบี่ยงเบนจากค่าคะแนน PCA ของแต่ละตัวอย่าง จะสามารถเขียนสมการได้ดังต่อไปนี้

$$X = x_{mean} + PC_{(A)} \cdot L_{(A)}^T + E_{(A)} \quad (2)$$

หากพิจารณาค่าความเข้มแต่ละสเปกตรัมของหนึ่งตัวอย่างจะได้

$$x_{ik} = x_{mean,k} + \sum_{a=1}^A pc \cdot l_{ka} + e_{ik(A)} \quad (3)$$

ทำการวิเคราะห์เชิงเมตริกซ์

$$\begin{aligned} \hat{l}'_a &= (\hat{pc}'_a \hat{pc}_a)^{-1} \hat{l}'_a X_{a-1} \\ \hat{l}_a &= \hat{l}'_a (\hat{l}'_a \hat{l}_a)^{-0.5} \\ \hat{l}_a &= \hat{l}'_a \hat{l}_a \\ X_a &= X_{a-1} - \hat{pc}_a \hat{l}'_a \end{aligned}$$

ค่าคะแนน PCA (PC) จะสามารถหาได้จากภายหลังการวิเคราะห์ PCA

$$\hat{pc}_a = (X_a - X_{a-1}) l_a \quad (4)$$

2.3.4 การปรับสเปกตรัมให้มีมาตรฐานเดียวกัน

เป็นการปรับแก้กลุ่มของสเปกตรัมเพื่อให้ได้สเปกตรัมที่มีจุดสำคัญเด่นขึ้น และเป็น การกำจัดความแปรปรวนอันเนื่องมาจากปัจจัยที่ไม่ต้องการออกไป ลดความซับซ้อนของข้อมูลช่วยให้นำข้อมูลสเปกตรัมไปทำสมการปรับเทียบ (Calibration equation) ได้ง่ายขึ้น โดยเริ่มจากการกำจัดสัญญาณรบกวนในระบบด้วยตัวกรอง (Filter) และการกำจัดผลกระทบที่มีผลทำให้เส้นพื้น (Baseline) ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการวัด

Savitzky–Golay Filter

การใช้งานที่ชัดเจนอย่างหนึ่งสำหรับ low-pass filters คือการทำให้ข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนราบรื่นขึ้น การที่จะได้ข้อมูลที่ราบเรียบวิธีหนึ่ง คือการวัดตัวแปรที่ทั้งแตกต่างกันอย่างช้า ๆ ซึ่งมักจะมีคลื่นสัญญาณรบกวนติดมา จากนั้นใช้การแทนที่แต่ละจุดข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ยของจุดข้อมูลที่อยู่รอบ ๆ เนื่องจากจุดที่อยู่ใกล้เคียงวัดค่าที่ใกล้เคียงกันมากค่าเฉลี่ยจึงสามารถลดระดับของสัญญาณรบกวนโดยไม่ส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนมากนัก

Savitzky-Golay filters เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการแสดงความกว้างสัมพัทธ์และความสูงของเส้นสเปกตรัมในข้อมูลสเปกตรัมที่มีสัญญาณรบกวน ดิจิตอลฟิลเตอร์ถูกนำไปใช้กับชุดของค่าข้อมูลที่เว้นระยะเท่ากัน $f_i \equiv f(t_i)$ โดยที่ $t_i \equiv t_0 + i\Delta$ สำหรับระยะห่างตัวอย่างคงที่ และ $i = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$ จะใช้วิธีแทนที่ค่าข้อมูลแต่ละค่า x_i โดยชุดค่าผสมเชิงเส้น X_i ของตัวเองและตัวเลขรอบๆข้าง

$$X_i = \sum_{n=-n_L}^{n_R} c_n x_i + n \quad (5)$$

โดย n_L คือจำนวนจุดที่ใช้ “ทางด้านซ้าย” ของจุดข้อมูล i , n_R คือจำนวนที่ใช้ทางด้านขวา โดยcausal filter จะมี $n_R = 0$

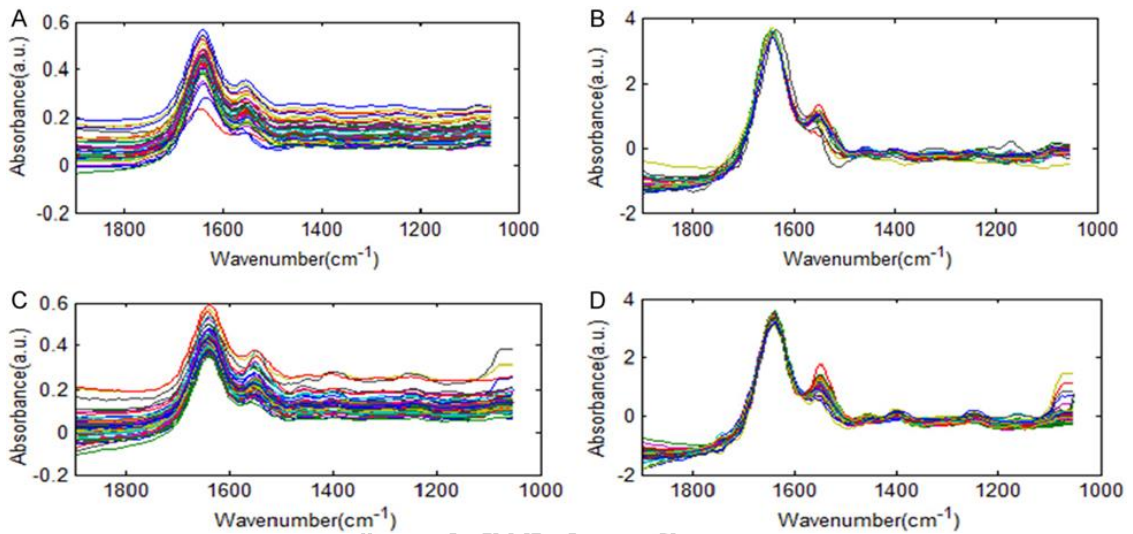
วิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานและการปรับแนวโน้ม (Standard Normal Variate (SNV) และ Detrending)

เป็นวิธีปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน โดยเป็นวิธีมักจะใช้คู่กับการปรับแนวโน้ม สเปกตรัม Detrending โดยใช้การปรับแก้ด้วย SNV แล้วจึงตามด้วยการปรับแก้แนวโน้มหรือการลดความโน้มเอียงของเส้นสเปกตรัม เพื่อปรับแก้ผลที่เกิดจากการกระเจิงแสงโดยผลจากการปรับแก้ดังภาพที่ 7 ซึ่งจะคล้ายกับวิธีแบบ MSC แต่จะแตกต่างตรงที่ไม่จำเป็นต้องใช้สเปกตรัมอ้างอิง ในวิธี SNV สเปกตรัมแต่ละเส้นจะถูกปรับแก้โดยปรับค่าจุดคลื่นให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน (Normalization) โดยปรับแก้ให้ค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมมีค่าเป็นศูนย์ ด้วยการนำค่าเฉลี่ยของสเปกตรัม ของตัวอย่างนั้นๆ มาลบออกจากค่าสเปกตรัมที่แต่ละความยาวคลื่นตลอดช่วง ปรับแก้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานให้เท่ากับหนึ่ง ดังแสดงในสมการ

$$X_{i(SNV)} = \frac{(X_i - \bar{x}_i)}{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^p (X_{i,j} - \bar{x}_i)^2}{(p-1)}}} \quad (6)$$

โดยที่ $X_{i,j}$ คือ ค่าจุดคลื่นที่ความยาวคลื่น j (ความยาวคลื่นมีทั้งหมด p ความยาวคลื่น) ของตัวอย่าง i

\bar{x}_i คือ ค่าเฉลี่ยของค่าการดูดกลืนตลอดช่วงสเปกตรัมของตัวอย่าง i



ภาพที่ 7 สเปกตรัม ที่ได้รับผลกระทบแบบผลคูณ (multiplicative effect) หลังจากการปรับแก้ด้วย SNV [19]

การปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ (Multiplicative scatter correction, MSC)

เป็นเทคนิคที่สร้างขึ้นมาเพื่อลดผลที่เกิดจากการกระเจิงแสง (Scattered light) ต่อสเปกตรัม NIR ที่ได้จากการวัดแบบสะท้อนแปรและแบบส่องผ่านโดยทั่วไปการกระเจิงแสงจะทำให้ความชันโดยรวมของสเปกตรัมเปลี่ยนไปดังภาพที่ 8 โดยมีสมการดังนี้

$$x_{iw} = a_i + b_i \bar{x}_w \quad (7)$$

$$w = 1, \dots, p$$

โดยที่ x_{iw} = ค่า $\log(1/R)$ ของตัวอย่าง i ที่ความยาวคลื่น w ของตัวอย่างที่มี p ความยาวคลื่น

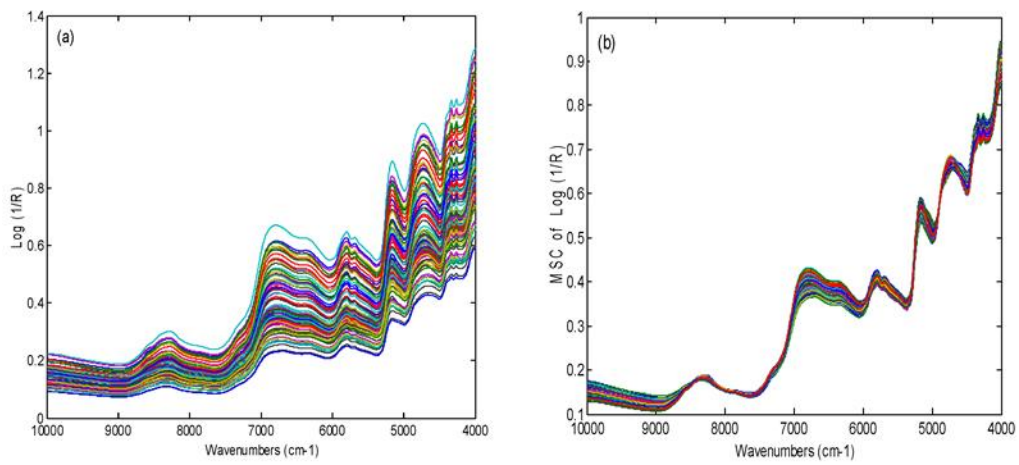
\bar{x}_w = ค่าเฉลี่ย $\log(1/R)$ ที่ความยาวคลื่น w ของตัวอย่างทั้งหมด

a_i และ b_i = ค่าคงที่สำหรับสมการความถดถอยของตัวอย่าง i

ในแต่ละตัวอย่าง ก็จะได้ค่า a_i และ b_i ที่แตกต่างกัน ค่า a_i และ b_i นี้จะนำมาใช้ในการปรับเส้นพื้นและหามุมสเปกตรัม เพื่อให้ได้ฐานเดียวกันทุกสเปกตรัม ดังสมการด้านล่างนี้

$$x_{i, MSC} = \frac{x_{iw} - a_i}{b_i} \quad (8)$$

$$w = 1, \dots, p$$



ภาพที่ 8 แสดงสเปกตรัม ที่ได้รับผลกระทบแบบผลคูณ (multiplicative effect) ก่อน และหลัง
ปรับแก้ด้วย MSC [20]



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ลักษณะขยะพลาสติกที่จะแยกชนิดมีสองลักษณะขึ้นอยู่กับการนำขยะมาผ่านกระบวนการตัดเป็นชิ้นก่อนการคัดแยก หรือ แยกก่อนนำไปตัดเป็นชิ้น ซึ่งขยะพลาสติกที่ไม่ผ่านการตัดเป็นชิ้น จะสามารถแยกได้ง่ายเนื่องจากขยะมีขนาดใหญ่ อาทิเช่น ขวดน้ำดื่ม ของเล่น เป็นต้น แต่อาจประสบปัญหาในการแยกชนิดเนื่องจากส่วนต่าง ๆ ของขยะที่ทำจากพลาสติกต่างชนิด เช่น ฝาขวดน้ำ ฉลาก และขวดน้ำ เป็นต้น การระบุตำแหน่งบนสายพานลำเลียงเนื่องมาจากรูปร่างที่มีลักษณะโค้งสามารถกลิ้งทำให้เปลี่ยนตำแหน่งขณะอยู่บนสายพาน อาจจะทำให้ขั้นตอนการแยกในภายหลังไม่แม่นยำ ในขณะที่พลาสติกที่ผ่านกระบวนการตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ สามารถระบุตำแหน่งการตีออกได้อย่างชัดเจน และการปะปนระหว่างพลาสติกสองชนิดน้อยลง การวิเคราะห์ชนิดของขยะพลาสติกบนสายพานลำเลียง จะทำให้สามารถระบุชนิดพลาสติกและสีของขยะทุกชิ้น เพื่อระบุตำแหน่งที่จะให้เครื่องคัดแยกดำเนินการแยกตามประเภทและสี ก่อนนำไปอัดบดเป็นพลาสติกสำหรับนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบขั้นตอนการดำเนินงานเป็นสี่ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการออกแบบเครื่องสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ติดตั้งบนสายพานลำเลียง การสร้างเครื่องและการสอบเทียบ ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างขยะพลาสติกจำลอง ขั้นตอนการหาสมการทำนายชนิดขยะพลาสติก ขั้นตอนการทดสอบการใช้งานเครื่องแยกชนิดขยะ

3.1 ออกแบบเครื่องสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้บนสายพานลำเลียง และสร้างเครื่อง ขั้นตอนการ Calibrate เครื่อง

3.1.1 ออกแบบเครื่องสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้บนสายพานลำเลียง (NIR LineScan)

ส่วนประกอบหลักของเครื่องวัดสเปกตรัมแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นถึงช่วงอินฟราเรดย่านใกล้บนสายพานลำเลียง จะมีส่วนประกอบและลำดับดังต่อไปนี้

กำลังการผลิต หรือ กำลังในการแยกขยะพลาสติก

การกำหนดชนิด รูปร่างของขยะ และปริมาณขยะที่จะแยกตามเวลา

ระบบสายพานลำเลียง

คำนวณความกว้างและความเร็วของสายพาน รวมทั้งกำลังของมอเตอร์ขับ ซึ่งในส่วนนี้ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท WJ Technology จำกัด

แหล่งกำเนิดแสง ระบบวัตสเปกตรัม

กำหนดชนิดของแหล่งกำเนิดแสง กำลังของแหล่งกำเนิดแสง ตำแหน่งติดตั้งของแหล่งกำเนิดแสง สลิตเนื้อสายพาน ระบบเลนส์รวมแสง ขนาดและชนิดของเกรตติ้งแบบส่องผ่าน และกล้องรับภาพ

3.1.2 การเปรียบเทียบเครื่องมือวัตสเปกตรัมบนสายพานกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน

การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของมุกกล้องและระยะกล้อง การเช็คตำแหน่งความยาวคลื่นของระบบรับภาพ

3.2 การเตรียมตัวอย่างขึ้นพลาสติกเพื่อการสร้างแบบจำลองทำนายชนิดพลาสติก (Calibration model)

ในงานวิจัยนี้เลือกพอลิเมอร์ 5 ชนิดตามปริมาณการใช้งานได้แก่ PET เกรด SA135T จากบริษัท ไทย เพ็ท เรซิน จำกัด (Thai PET Resin Co.,Ltd), HDPE เกรด HD60005 จากบริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด มหาชน (PTT global chemical public.,Ltd), PP เกรด 2300K, PS เกรด GP150 จาก บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (IRPC public Co.,Ltd) และ PVC คอมพาวด์สีขาวเกรด SG660 R9173022 04134 จากบริษัท ไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด (มหาชน) (Thai plastics and chemicals PCL.) โดยจะขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (compression molding) ของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร ใช้สภาวะการขึ้นรูปดังแสดงในตารางที่ 5 โดยการเตรียมใช้พอลิเมอร์บริสุทธิ์หรือพอลิเมอร์สีขาวมาเป็นตัวอย่งทดสอบ เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากสารให้สี และพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมสีได้รับการสนับสนุนจากบริษัท สาลีคัลเลอร์ จำกัด (มหาชน) (Salee colour public co.,ltd) จำกัด จำนวน 3 สี คือ แดง เขียว และน้ำเงิน มีองค์ประกอบดังตารางที่ 6 ซึ่งองค์ประกอบบางอย่างอาจมีผลกระทบต่อสเปกตรัมด้วย และเนื่องจากการวัดการส่องผ่านสะท้อน (Transflectance) ของแสงที่ส่องไปยังชิ้นงาน ในงานวิจัยนี้จึงเตรียมชิ้นงานที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร และนำตัวอย่างขนาด 3 มิลลิเมตร มาทำการขีดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 0 และ เบอร์ 10 เพื่อให้เกิดการกระเจิงของแสงในทิศทางอื่นเพื่อจำลองการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างการฝังกลบ

3.2.1 นำเม็ดพลาสติกไปขึ้นรูปด้วยวิธี Compression molding โดยใช้โมลรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 30 ตารางเซนติเมตร ที่มีความหนา 1 3 และ 5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 5 สภาวะการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธี Compression Molding

ชนิดพลาสติก	ความหนา	ปริมาณ (กรัม)	อุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูป (°C)	เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป (นาที)			
				Heat	Venting	Compress	Cooling
PET	1	60	260	8	5	5	10
	3	180					
	5	450					
HDPE	1	60	160	4	2	2	3
	3	180					
	5	430					
PP	1	56	200	5	3	3	5
	3	190					
	5	400					
PS	1	70	220	4	2	2	3
	3	200					
	5	400					
PVC	1	70	220	4	2	2	3
	3	200					
	5	450					

ตารางที่ 6 สารเติมแต่งต่างๆ ที่มีการผสมในเม็ดสีพอลิเมอร์แต่ละชนิด

Polymer	Color	Code Name	Black pigment	Blue dyestuff pigment	Blue Pigment	Green dyestuff pigment	Green pigment	Orange Pigment	Red dyestuff pigment	Red Pigment	Pearl Pigment	Yellow dyestuff pigment	Yellow pigment	PE Wax	EBS Wax	PET Resin	LLDPE Resin	PP Resin	HIPS Resin	GPPS Resin	PVC RESIN	Anti static Additive	DINP	Heat stabilizer Additive	Kaolin	Calcium Carbonate	Titanium Dioxide
			PET	Red	MTRD7689							✓							✓						✓		
Green	MTGN14168			✓				✓				✓				✓						✓					
Blue	MTBL13358			✓		✓										✓						✓					
HDPE	Red	<no information>																									
	Green	<no information>																									
	Blue	MHBL18061			✓					✓				✓			✓										
PP	Red	MPRD17801	✓							✓	✓			✓													
	Green	MPGN7041				✓								✓													
	Blue	MPBL16930			✓									✓											✓	✓	
PS	Red	MSRD17647							✓						✓												✓
	Green	MSGN16310				✓									✓												✓
	Blue	MSBL17552		✓											✓												✓
PVC	Red	MVRD15867								✓				✓								✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Green	MVGN16117				✓							✓	✓								✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Blue	MVBL13149	✓	✓										✓								✓	✓	✓	✓	✓	✓

3.2.2 การเก็บข้อมูลสเปกตรัมเพื่อนำไปสร้างแบบจำลองทำนาย

นำชิ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปตัดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1.5 เซนติเมตร แยกตามชนิดของพลาสติก สี ความหนา ลักษณะพื้นผิว มาวางบนสายพานลำเลียงตรงตำแหน่งช่องสลิต แล้วบันทึกข้อมูลสเปกตรัมของชิ้นงานในรูปแบบของรูปภาพ แล้วนำไปแปลงเป็นค่าสเปกตรัมของแต่ละตำแหน่งบนสายพานลำเลียง ในงานวิจัยจะทำการวัดสเปกตรัมด้วยเครื่องวัด 3 เครื่องได้แก่

3.2.2.1 เครื่องวัด Multispectrometer (HandySpec Field, Tec5AG)

3.2.2.2 เครื่องวัดสเปกตรัมบนสายพานขนาดความกว้าง 30 เซนติเมตร NIR LineScan Ia

3.2.2.2 เครื่องวัดสเปกตรัมบนสายพานขนาดความกว้าง 80 เซนติเมตร NIR LineScan Ib

3.3 ขั้นตอนการหาสมการทำนายชนิดขยะพลาสติก

3.3.1 การปรับปรุงสเปกตรัม

การวัดสเปกตรัมช่วงแสงที่ตาเห็นถึงช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ในเครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการ จะดำเนินการวัดตัวอย่างเดิมซ้ำหลายๆ ครั้ง เพื่อสะสมปริมาณแสงหรือนำค่ามาเฉลี่ย เพื่อให้ได้สัญญาณที่ชัดเจนและกำจัดสัญญาณรบกวน ในขณะที่สเปกตรัมที่ได้จากการวัด conveyor ที่มีการเคลื่อนที่ไม่สามารถดำเนินการเช่นนั้นได้ ประกอบกับลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างที่แตกต่างในด้านของชนิด สี ความหนา และความขรุขระของพื้นผิว ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาวิธีการปรับปรุงสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์ เพื่อให้ได้สเปกตรัมที่มีมาตรฐานเดียวกันก่อนการนำไปวิเคราะห์การแยกกลุ่ม ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาแนวทางการปรับปรุงสเปกตรัมแบบ SNV, MSC และ Savitzky-Golay

3.3.2 การวิเคราะห์แยกกลุ่มตัวอย่างพอลิเมอร์

เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์การจัดกลุ่มด้วยเทคนิค Principle component analysis (PCA) บนโปรแกรม Matlab เพื่อหาค่า loading x ค่า B0 ที่ใช้ในการจำแนกแยกกลุ่มตัวอย่าง สำหรับนำไปใส่ในโปรแกรม Labview เพื่อใช้ทำนายชนิดของพลาสติกบนสายพานต่อไป

3.4 การทดสอบการจำแนกชนิดขยะบนสายพานลำเลียงขนาดความกว้าง 80 เซนติเมตร (NIR LineScan Ib)

3.4.1 การสร้างแบบจำลองทำนายชนิดพลาสติกบนสายพานสำหรับเครื่อง (NIR LineScan Ib)

ภายหลังจากติดตั้งและปรับเทียบตำแหน่งความยาวคลื่นของสเปกตรัมบนภาพ จะทำการวัดตัวอย่างขยะจำลองในหัวข้อ 3.3.1 และหาค่า loading x และค่า B0 จากหัวข้อ 3.3.2 ทำการนำ

ขยะพลาสติกจำลองมาทำการทดสอบการทำนายบนสายพานเคลื่อนที่ และนำขยะพลาสติกที่ทราบชนิดชัดเจนมาทดสอบบนสายพานเพื่อคำนวณร้อยละของการแยกชนิด และร้อยละของความบริสุทธิ์ที่แยกได้



บทที่ 4

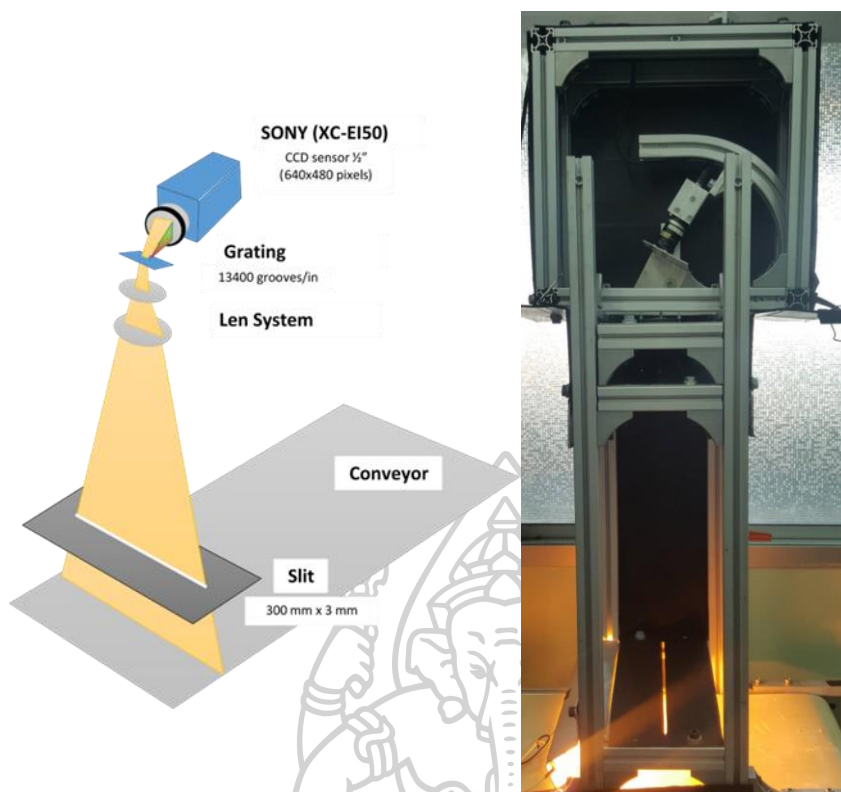
ผลการทดลอง

4.1 โครงสร้าง องค์ประกอบ และขั้นตอนการเปรียบเทียบ

4.1.1 โครงสร้าง องค์ประกอบทั่วไปของเครื่องแยกชนิดขยะด้วยแสงที่เห็นด้วยตาและอินฟราเรด ย่านใกล้ (400-1000 nm) และขั้นตอนการเปรียบเทียบ

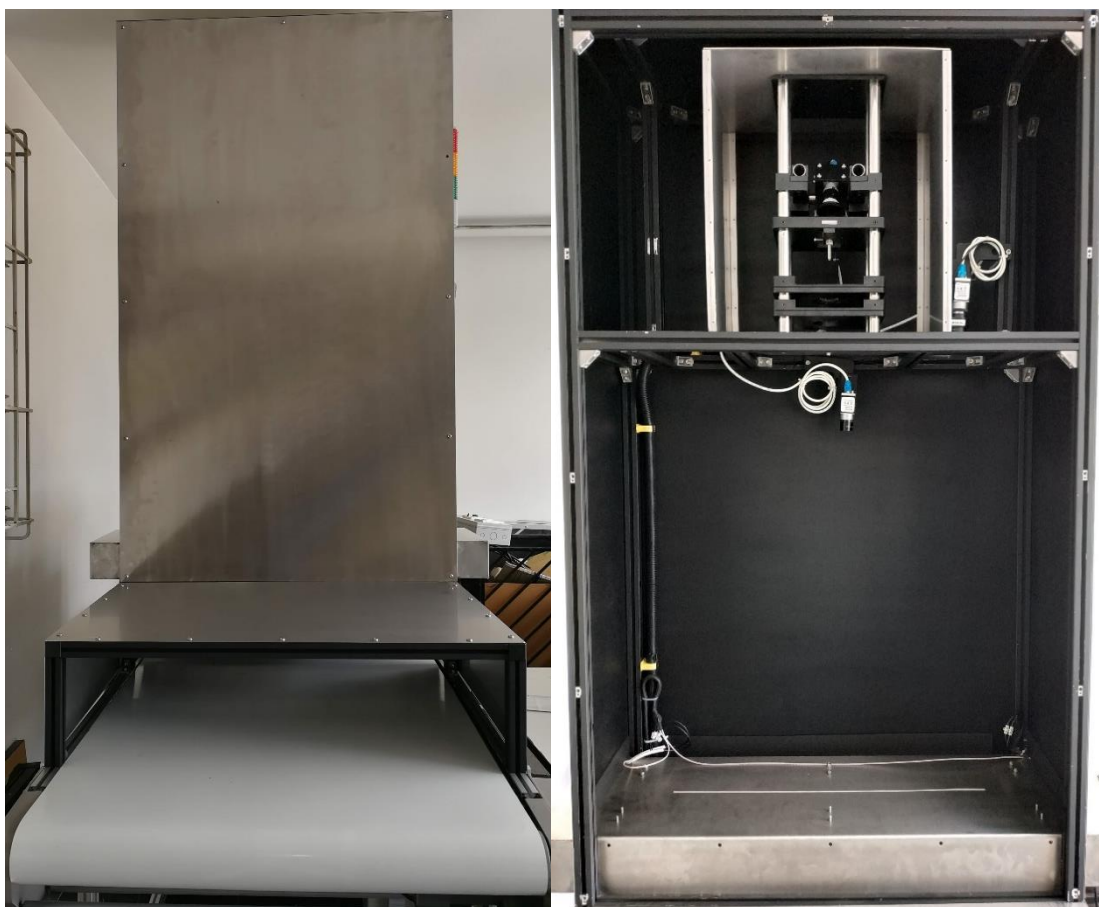
การออกแบบเครื่อง NIR line scan

เครื่อง NIR LineScan Ia (หนึ่งเอ) เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่เหนือสายพานลำเลียงขนาด 30 เซนติเมตร ประกอบด้วย สลิต เลนส์ เกรตติง กล้อง อยู่ในกล่องดำที่ปิดมิดชิด แต่ช่วงตั้งแต่สลิตถึงเลนส์ตัวที่หนึ่งเปิดโล่งไว้ ทำการออกแบบการวัดสเปกตรัมให้มีรูปแบบการวัดแบบส่องผ่านสะท้อน (transflectance) แผ่นสลิต (slit) ขนาด 300 มม. x 3 มม. ติดตั้งสูงจากระดับสายพานลำเลียง 10 เซนติเมตร พร้อมแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดความร้อนเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ขนาด 1000 วัตต์ แสงที่สะท้อนจากผิวตัวอย่างจะส่องผ่านเลนส์นูนสองตัวเพื่อลดขนาดภาพเข้าสู่เกรตติงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 15 มิลลิเมตร ชนิด 13400 ช่องต่อนิ้ว ที่บิดอยู่ด้วยมุม 21 องศา ดังภาพที่ 9 เพื่อให้ได้ความละเอียดของภาพจากเกรตติงมากขึ้น แล้วเข้าสู่กล้อง SONY XC-EI50 (ความละเอียด 768 พิกเซล x 494 พิกเซล) ได้เป็นภาพขนาด 316 พิกเซล x 165 พิกเซล สเปกตรัมที่วัดได้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-1000 นาโนเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดจริงบนสายพาน จะพบว่าสเปกตรัมที่ได้มีความละเอียดประมาณ 2 นาโนเมตร เครื่องมือชุดนี้สามารถวัดได้ละเอียด 1.82 มิลลิเมตรตามความกว้างของสายพาน ความละเอียดในการวัดตามความยาวของสายพานขึ้นอยู่กับค่า frame rate ของกล้องกับการ์ดจับภาพวิดีโอ (จำนวนภาพต่อหนึ่งวินาที) และอัตราการเคลื่อนที่ของสายพาน ยกตัวอย่างเช่น สายพานเคลื่อนที่ 300 มม.ต่อวินาทีและอัตราการจับภาพ 30 frame/s ทำให้ในหนึ่งเฟรมจะได้ภาพสเปกตรัมของพื้นที่ขนาด 1.82 มม x 10 มม. บนตัวอย่างที่ทำการวัด เป็นต้น เลนส์ขนาดความยาวโฟกัส 10 เซนติเมตร 2 ตัว เกรตติงแบบส่องผ่าน 13400 ช่อง/ตารางนิ้ว กล้อง Sony XCEI-50 พร้อมเลนส์ความยาวโฟกัส 16 มิลลิเมตร เมื่อปรับเทียบความยาวคลื่นกับเครื่อง ได้ความละเอียดในช่วง 2 นาโนเมตร/พิกเซล



ภาพที่ 9 ลักษณะและส่วนประกอบของเครื่อง NIR LineScan 1a

ภาพที่ 10 เป็น เครื่อง line scan 1b (หนึ่งปี) เป็นการต่อยอดจาก line scan 1a โดยมีอุปกรณ์พื้นฐานแบบเดียวกัน คือ สลิต เลนส์ เกรตติง กล้อง ติดตั้งอยู่เหนือสายพานลำเลียงขนาด 80 เซนติเมตร เนื่องจากมีระยะและขนาดภาพที่ใหญ่มากขึ้นทำให้ห้องคาและระยะของอุปกรณ์ต่างๆ เปลี่ยนแปลงไปจากเครื่อง 1a อุปกรณ์เลนส์และระบบรับภาพจะถูกติดตั้งอยู่ในตู้ที่ปิดสนิทตั้งแต่สลิตขึ้นมาเพื่อป้องกันแสงรบกวนจากภายนอก โดยระบบนี้ได้พัฒนาร่วมกับบริษัท ดับบลิวเจเทคโนโลยี จำกัด เครื่องมือชุดนี้สามารถวัดได้ละเอียด 0.625 มิลลิเมตรตามความกว้างของสายพาน ความละเอียดในการวัดตามความยาวของสายพานขึ้นอยู่กับค่า frame rate ของกล้องกับการจับภาพวิดีโอ (จำนวนภาพต่อหนึ่งวินาที) และอัตราการเคลื่อนที่ของสายพาน ตัวเครื่องส่วนบน ขนาด 36x90x170 เซนติเมตร ที่มีฝาปิดรอบด้าน แหล่งกำเนิดแสง ยาว 1 เมตร กำลัง 1000 วัตต์ 1 หลอด ช่องสลิตขนาด 3x750 มิลลิเมตร เกรตติงแบบส่องผ่าน 600 ช่อง/ตารางนิ้ว ขนาด 25x25 มิลลิเมตร กล้อง Basler acA2500 ความละเอียด (2590x2048 pixel) ได้สเปกตรัมที่มีความละเอียด (resolution) 0.45 นาโนเมตร/พิกเซล



ภาพที่ 10 ลักษณะและส่วนประกอบของเครื่อง NIR line scan Ib

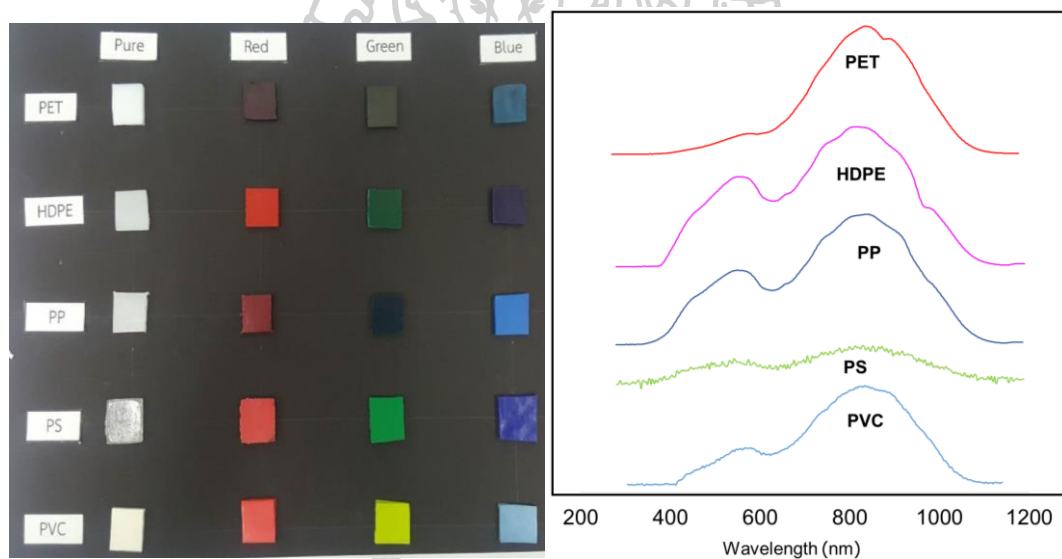
ตารางที่ 7 เปรียบเทียบเครื่อง NIR LineScan Ia และ LineScan Ib

Specifications	NIR LineScan Ia	NIR LineScan Ib
Conveyor width	300 mm	800 mm
Conveyor speed	0-1 m/s	0-4 m/s
Spectrum resolution (average)	2 nm	0.45 nm
Conveyor length	10 mm (at speed 1 m/s)	10 cm (at speed 30 cm/s)
Conveyor width per pixel	1.82 mm	0.625 mm

ตารางที่ 7 เป็นตารางสรุปเชิงเปรียบเทียบรายละเอียดที่แตกต่างกันระหว่างเครื่อง NIR line scan Ia กับ NIR line scan Ib เพื่อให้เห็นรายละเอียดต่างๆ ได้ชัดเจน โดยจะเน้นความสำคัญไปที่ความละเอียดของสเปกตรัม (spectrum resolution) และค่าความกว้างของสายพานลำเลียงต่อพิกเซล ที่เครื่อง NIR line scan Ib มีความละเอียดสูงกว่ามาก ซึ่งผลการทดลองต่อจากนี้จึงจะกล่าวถึงผลการทดลองจากเครื่อง Multispectrometer เทียบกับเครื่อง NIR line scan Ib เนื่องจาก NIR line scan Ia และ Ib มีช่วงความยาวคลื่นอยู่ที่ใกล้เคียงกัน และเป็นระบบการทำงานที่เหมือนกัน

4.2 ผลกระทบของชนิดของพอลิเมอร์ สี ความหนา สภาพพื้นผิว ต่อสเปกตรัมดิบ

ชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้จะเป็นดังภาพที่ 11 โดย PET บริสุทธิ์จะมีสีขาวขุ่นเนื่องจากการเย็นตัวของชิ้นงานแบบไม่เร็วพอทำให้ชิ้นงานไม่ใส ส่วนชิ้นที่เป็นสีจะมีสีค่อนข้างมืด และทึบแสง อาจเป็นผลมาจากเม็ดสีที่ผสมเข้าไป ส่วน HDPE บริสุทธิ์จะมีสีขาวขุ่น โปรงแสงเล็กน้อย ชิ้นงานสีแดงเป็นสีแดงสด สีเขียวและสีน้ำเงินค่อนข้างทึบ PP บริสุทธิ์มีลักษณะใกล้เคียงกับ HDPE บริสุทธิ์มาก แต่ชิ้นงานสีแดงต่างกันอย่างชัดเจน โดยสีแดงจะเป็นสีแดงเลือนหมู เพราะผสมเม็ดสีดำเข้าไปด้วย สีเขียวมีตมมากจนใกล้เคียงสีดำ ส่วนสีน้ำเงินจะเป็นสีฟ้าเนื่องจากมีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ลงไป ส่วน PS บริสุทธิ์จะมีลักษณะโปรงใส ส่วนชิ้นงานสีจะทึบแสง อาจเป็นผลมาจากการเติมไททาเนียม (titanium dioxide) ลงไป ส่วน PVC สีขาวจะเป็นสีขาวทึบ แข็ง แต่ชิ้นงานสีจะอ่อนนุ่มและสีอ่อนซึ่งอาจเกิดจากการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ลงไปผสมด้วย และเมื่อตรวจสอบ PP สีน้ำเงินซึ่งมีการเติม CaCO_3 ด้วย ปรากฏว่า สีที่ได้จะอ่อนลงเช่นเดียวกัน

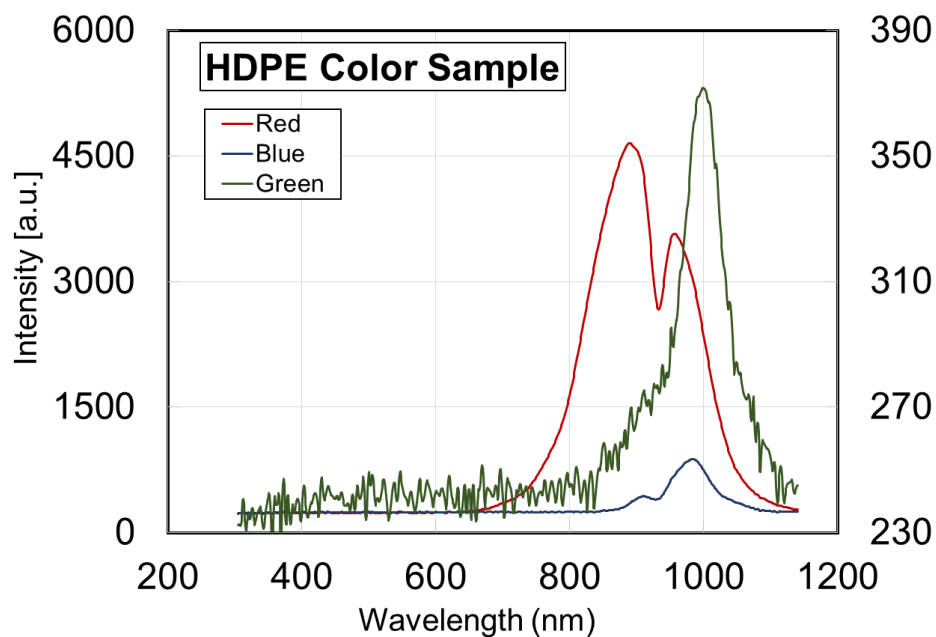


ภาพที่ 11 ตัวอย่างชิ้นงานที่เตรียมได้และสเปกตรัมของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้ง 5 ชนิด

4.2.1 สเปกตรัมดิบจากเครื่อง Multispectrometer

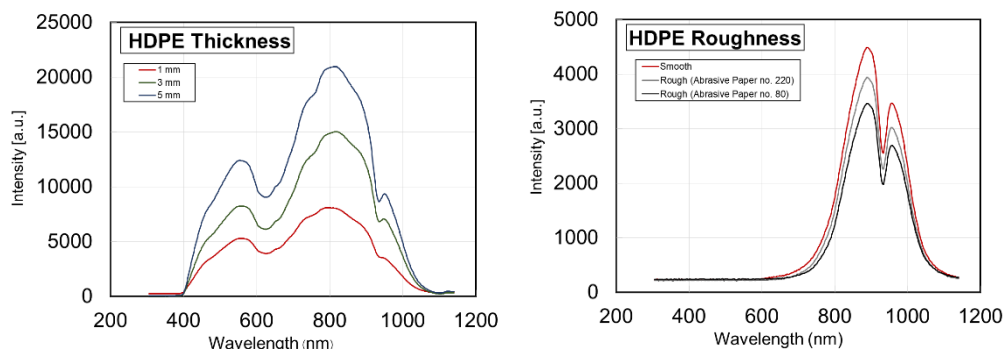
การวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง Multispectrometer เป็นแบบ one point scan คือการเก็บข้อมูลตัวอย่างจากจุดเดียวโดยใช้เป็นหัววัดช่องของแหล่งกำเนิดอยู่รอบๆ ช่องรับแสงที่เชื่อมต่อกับตัวเครื่องด้วยเส้นใยแก้วนำแสงไปสัมผัสกับตัวอย่างโดยตรง ทำให้ได้ข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ จึงไม่ต้องใช้ตัวกรอง(filter) เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนก่อน ดังตัวอย่างในภาพที่ ทางด้านขวา เป็นตัวอย่างสเปกตรัมของชิ้นงานพอลิเมอร์บริสุทธิ์ และ PVC สีขาวจากเครื่อง multispectrometer

ส่วนชิ้นงานที่เป็นสีของชิ้นงานตัวอย่างไม่ปรากฏสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ดังภาพที่ 12 อาจเพราะตัวอย่างมีความทึบแสงจากการผสมกับเม็ดสี (pigment) และหัววัดสัมผัสแนบสนิทกับชิ้นงานประกอบกับแสงในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวมีความสามารถในการทะลุทะลวงน้อยทำให้ไม่สามารถทะลุผ่านชิ้นงานเข้าสู่ช่องรับแสงได้ แต่ไปปรากฏพิคในช่วง 800-1000 นาโนเมตร ทำให้สเปกตรัมที่ได้มีความเข้มต่ำและมีความจำเป็นต้องทำการ normalized สัญญาณเพื่อให้มีความเข้มเท่ากัน



ภาพที่ 12 สเปกตรัมดิบของพลาสติกชนิด HDPE สีแดง สีน้ำเงินและสีเขียว

จากผลการทดลองในภาพที่ 13 พบว่า ความหนาของชิ้นงานส่งผลต่อการวัดด้วยเครื่อง Multispectrometer ถึงแม้ว่าการวัดในเครื่องนี้จะทำการวัดแบบ one point scan ซึ่งทำการวัดจำนวนหลายรอบก่อนนำสเปกตรัมมาเฉลี่ย แต่กลับพบว่าชิ้นงานที่หนามากขึ้นจะมีผลต่อการสะท้อนแสงมากขึ้นซึ่งจะมีผลอย่างมากเมื่อชิ้นงานมีความโปร่งแสง แม้เพียงเล็กน้อยก็ตาม โดยมีผลกระทบทั้งเรื่องความสามารถในการสะท้อนแสง และความสามารถในการดูดกลืนแสงของชิ้นงาน ดังนั้นควรต้องปรับปรุงสเปกตรัมด้วยวิธี normalized ให้มีความเข้มที่เท่ากัน หรือใช้วิธี Standard normal variate (SNV) เพื่อปรับเส้นฐานและความเข้มแสงให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน เพื่อเป็นการลดปัจจัยรบกวนก่อนที่จะวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCA

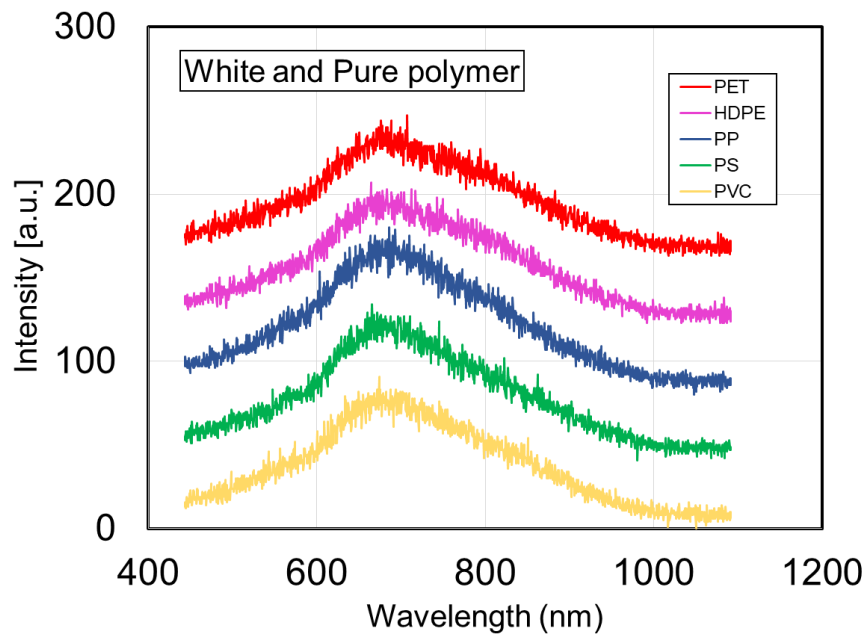


ภาพที่ 13 สเปกตรัมดิบที่มีผลจากความหนาของชิ้นงานที่ต่างกัน (ซ้าย) และผลจากลักษณะพื้นผิวที่ต่างกัน (ขวา)

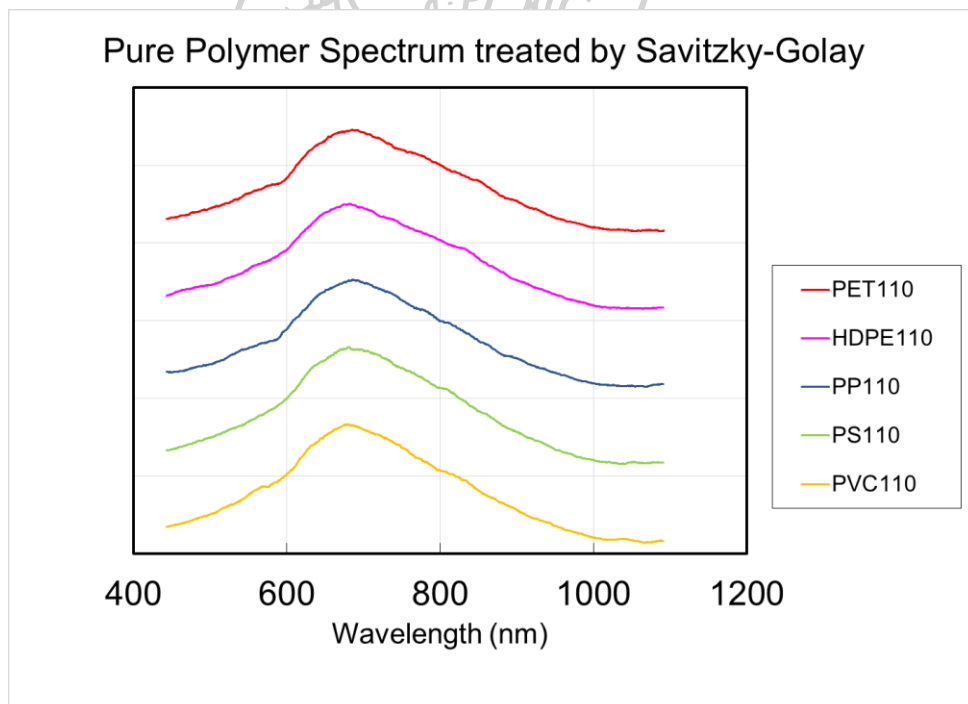
ในส่วนของลักษณะผิวก็มีผลกระทบต่อความเข้มแสงด้วยเช่นกัน เนื่องจากผิวเรียบและผิวขรุขระมีการสะท้อนแสงที่ไม่เหมือนกัน และผิวขรุขระยังส่งผลให้เกิดการกระเจิงของแสงตามร่องรอยต่างๆ ทำให้ความเข้มแสงที่ได้มีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่มีผิวเรียบ และยิ่งผิวมีความขรุขระมากขึ้นก็จะยิ่งเกิดการกระเจิงแสงมากขึ้น ทำให้แสงที่สะท้อนไปเข้าเลนส์มีน้อยลง หากต้องการลดผลกระทบนี้ วิธี Standard normal variate (SNV) จะสามารถปรับเส้นฐานและความเข้มแสงให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน ได้เช่นเดียวกับผลกระทบของความหนาชิ้นงานที่แตกต่างกัน

4.2.2 สเปกตรัมที่วัดได้จากเครื่อง NIR LineScan Ib (400-1000 nm, 80 cm)

สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง NIR line scan จะอยู่ในโหมด Raw spectrum หรือสเปกตรัมดิบ ซึ่งมีสัญญาณรบกวนปะปนอยู่ ภาพที่ 14 แสดงถึงสเปกตรัมดิบของพอลิเมอร์บริสุทธิ์แต่ละชนิดที่ได้จากเครื่อง NIR line scan พบว่า มี สัญญาณรบกวนค่อนข้างมาก ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการใช้เทคนิค line scan ที่มีผลของระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับตัวกล้องรับภาพ จึงควรปรับปรุงสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมีขั้นตอนการปรับปรุงสเปกตรัมอยู่ 2 ขั้นตอน โดยขั้นที่หนึ่งจะใช้วิธีของ Savitzky-Golay โดยใช้ $n=20$ เพื่อลดสัญญาณรบกวน (noise) ในเบื้องต้นแต่ยังคงเส้นฐานไว้เท่าเดิม ดังภาพที่ 15



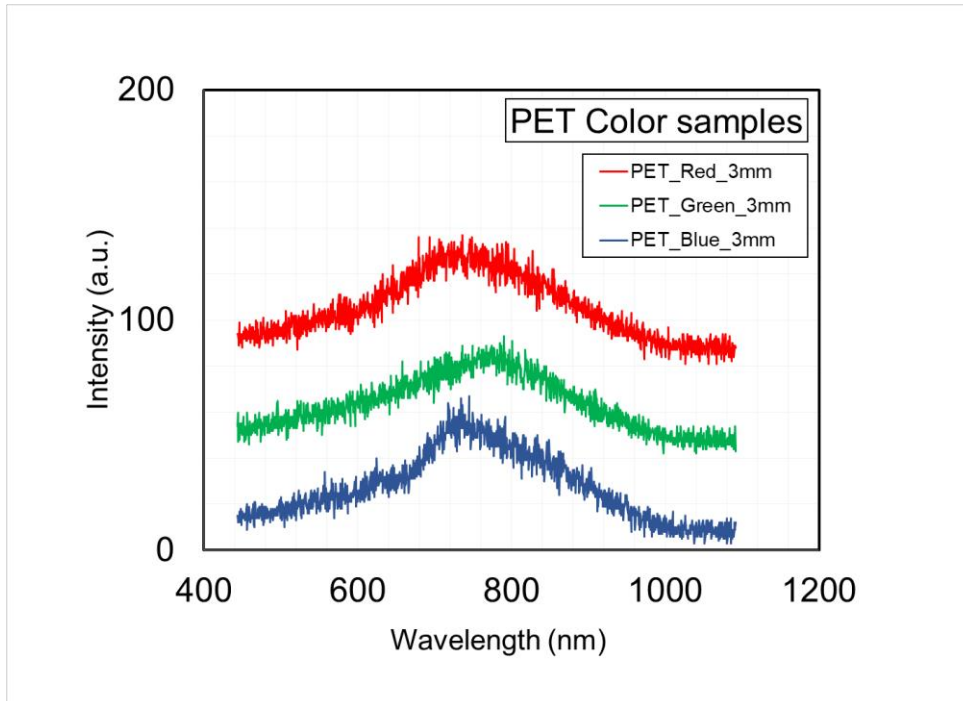
ภาพที่ 14 สเปกตรัมดิบ 400-1000 nm line scan lb



ภาพที่ 15 สเปกตรัมพอลิเมอร์ 5 ชนิดหลังการปรับปรุงด้วยวิธีของ Savitzky-Golay

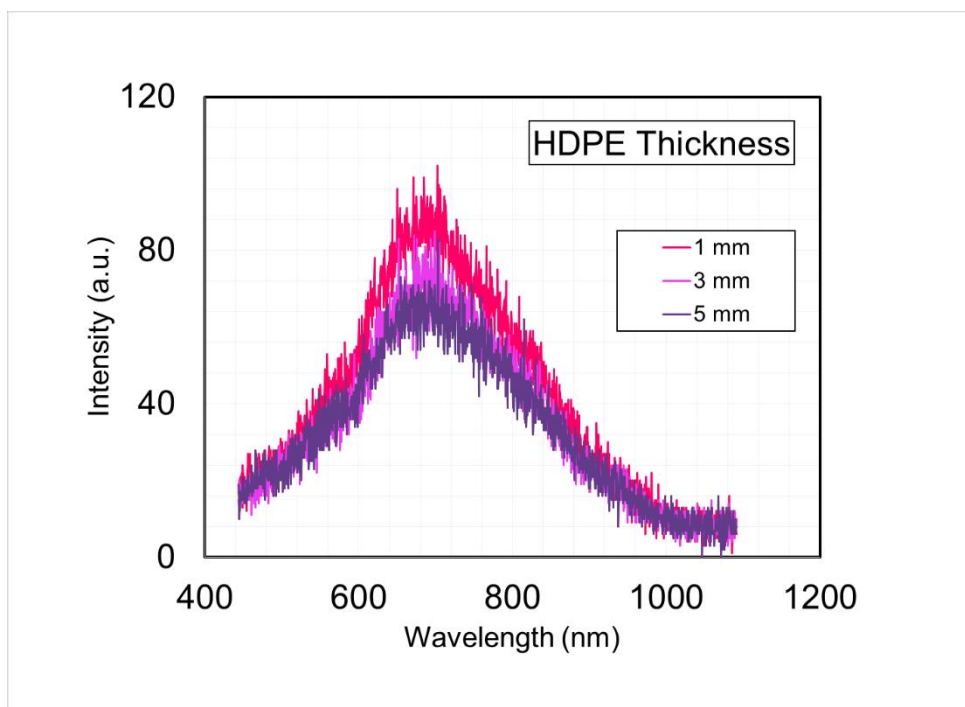
ภาพที่ 16 เป็นสเปกตรัมดิบของ PET แต่ละสีจากเครื่อง Line scan lb ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ อยู่ 3 สีหลักทางแสง คือ แดง เขียว และน้ำเงิน จะเห็นว่า ลักษณะพีคที่ได้ต่างกับสเปกตรัมจากเครื่อง multispectrometer อย่างชัดเจน โดยจะมีพีคปรากฏอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400-1000 นาโนเมตร

และมีสัญญาณรบกวนอยู่ค่อนข้างมาก แต่ยังมีพีคส่วนที่แตกต่างกันอยู่ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCA ต่อไป



ภาพที่ 16 สเปกตรัมดิบของพลาสติกชนิด PET สีแดง สีน้ำเงินและสีเขียว

จากในภาพที่ 17 เป็นตัวอย่างสเปกตรัมที่เลือกมาจากชิ้นงานต่างความหนาอย่างละ 1 เส้น จะความหนาของชิ้นงานไม่ค่อยส่งผลกระทบต่อเครื่อง NIR line scan อาจเพราะชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับระบบ และมีความหนาแตกต่างกันเพียงหลักมิลลิเมตร เมื่อเทียบกับระยะจากชิ้นงานไปจนถึงกล้องรับภาพ และเมื่อกลับไปพิจารณาที่สเปกตรัมหลายๆ เส้น พบว่า มีการกระจายตัวของความเข้มแสงจนไม่สามารถสังเกตผลของความหนาของชิ้นงานตัวอย่างได้ แต่คาดว่าเมื่อนำสเปกตรัมและหากชิ้นงานมีความหนามากๆ จะส่งผลต่อความเข้มแสงมากกว่านี้เนื่องจากเป็นระบบที่อาศัยการดูดกลืนและสะท้อนกลับของแสง

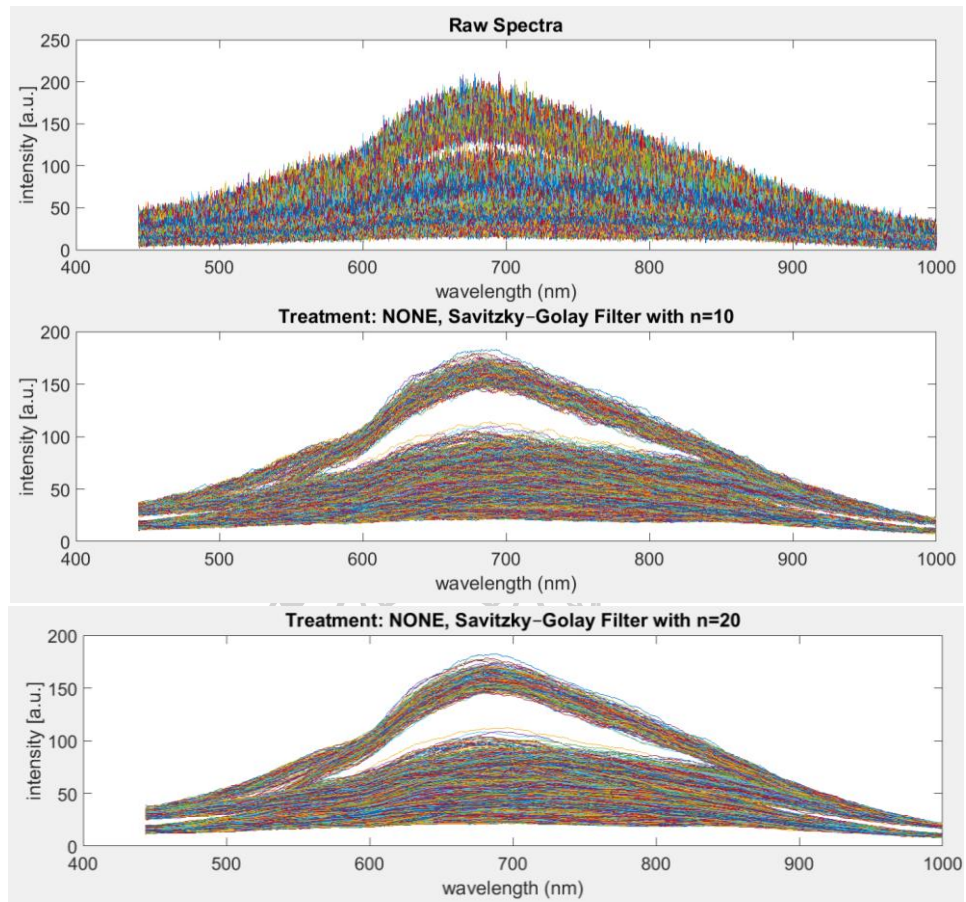


ภาพที่ 17 สเปกตรัมดิบของพลาสติกชนิด PVC ที่ความหนา 1, 3 และ 5 mm

4.2.3 การปรับปรุงสเปกตรัมที่วัดได้จากเครื่อง NIR LineScan Ib (400-1000 nm, 80 cm)

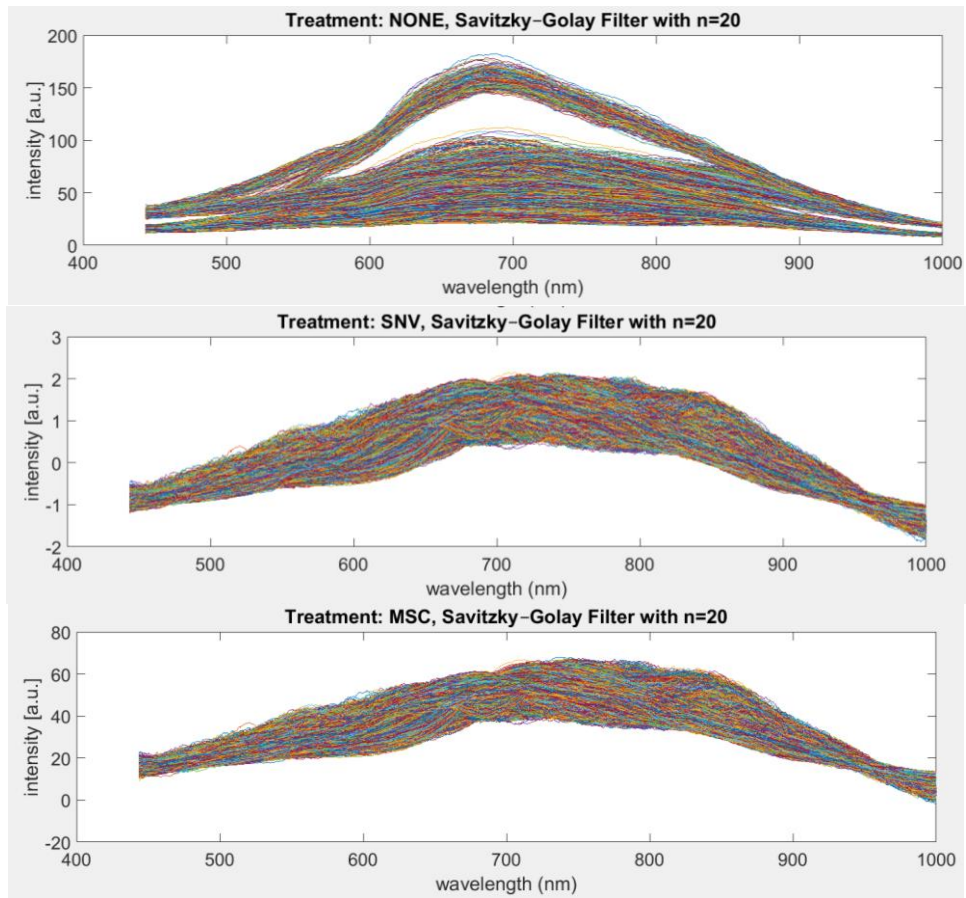
การกำจัดสัญญาณรบกวนโดยเทคนิค Savitzky-Golay โดยใช้ $n=10$ และ $n=20$

การวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง NIR LineScan Ib จะมีสัญญาณรบกวนมากสังเกตได้จากเส้นกราฟที่มีพิกเล็ๆ ปราบกอยู่ตลอดเส้นกราฟทำให้มีความจำเป็นต้องกำจัดสัญญาณรบกวนในลำดับแรกก่อนการนำสเปกตรัมไปวิเคราะห์เพื่อลดพิกเล็ๆ และช่วยให้เห็นพิกที่สำคัญชัดเจนขึ้น โดยเลือกใช้เทคนิค Savitzky-Golay ซึ่งเป็นการหาค่าเฉลี่ยโดยสามารถกำหนดปริมาณข้อมูลรอบข้างที่นำมาเฉลี่ยให้การโดยการกำหนดค่า n ดังตัวอย่างในภาพที่ 18 แสดงการกรองสัญญาณที่ใช้ $n=10$ และ $n=20$ ของเส้นสเปกตรัม 12027 เส้นจากตัวอย่างจำนวน 1677 ชิ้นงาน พบว่าการใช้ $n=10$ ยังคงมีสัญญาณรบกวนอยู่ปริมาณมาก ซึ่งจะส่งผลต่อการวิเคราะห์ PCA ในลำดับต่อไปได้ซึ่งจะทำให้ได้ค่าโหนดดิงที่มีตำแหน่งไม่ชัดเจน ทำให้ในงานวิจัยนี้เลือก $n=20$ สำหรับการกรองสัญญาณจากเครื่อง NIR-LineScan Ib ในขณะที่สเปกตรัมที่วัดจากเครื่อง Multispectrometer มีสัญญาณรบกวนน้อย เนื่องจากมีการวัดซ้ำหลายรอบเพื่อเฉลี่ยทำให้เส้นสเปกตรัมที่ได้มีสัญญาณรบกวนต่ำอยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องใช้เทคนิค Savitzky-Golay



ภาพที่ 18 สเปกตรัมดิบ สเปกตรัมที่ผ่านตัวกรองแบบ Savitzky-Golay ที่ $n=10$ และ $n=20$

จากที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ว่าสเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง NIR-LineScan มีเส้นฐาน และความเข้มแสงที่ไม่เท่ากันทุกจุดบนสายพาน หลังจากที่ได้ลดสัญญาณรบกวนไปแล้ว วิธี Standard normal variate (SNV) และ Multiplicative scatter correction (MSC) จะได้เส้นสเปกตรัมที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว ดังภาพที่ 19 เมื่อทำการปรับปรุงสเปกตรัมด้วยวิธี Standard Normal Variate (SNV) ค่าความเข้มแสงจะถูกเฉลี่ยด้วยค่าความเข้มแสงเฉลี่ยทำให้สเปกตรัมที่มีเส้นฐานต่างกันจะถูกปรับฐานโดยการหาร (normalization) ทำให้ค่าความเข้มแสงที่ได้หลังจากการใช้วิธี SNV อยู่ในในช่วงค่า -1 ถึง 2 ในขณะที่วิธี Multiplicative scatter correction (MSC) ซึ่งเป็นวิธีลดการกระเจิงแสงแบบผลคูณ จะลดผลกระทบของเส้นฐานที่ไม่เท่ากันให้กลับมาอยู่ฐานเดียวกัน และการปรับปรุงสเปกตรัมครอบคลุมไปถึงการกระเจิงแสงทำให้ได้ลักษณะเส้นที่ใกล้เคียงกันของทุกเส้นของตัวอย่างมากกว่า SNV ในงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้การปรับเส้นสเปกตรัม 3 วิธี คือ การทำ Normalized เส้นสเปกตรัม, การทำ SNV และ การทำ MSC ก่อนนำไปวิเคราะห์ PCA เพื่อให้เกิดการแยกชนิดพอลิเมอร์ที่ชัดเจนมากที่สุด



ภาพที่ 19 สเปกตรัมที่ผ่านการปรับปรุงด้วยวิธี Standard Normal Variate (SNV) และ Multiplicative scatter correction (MSC)



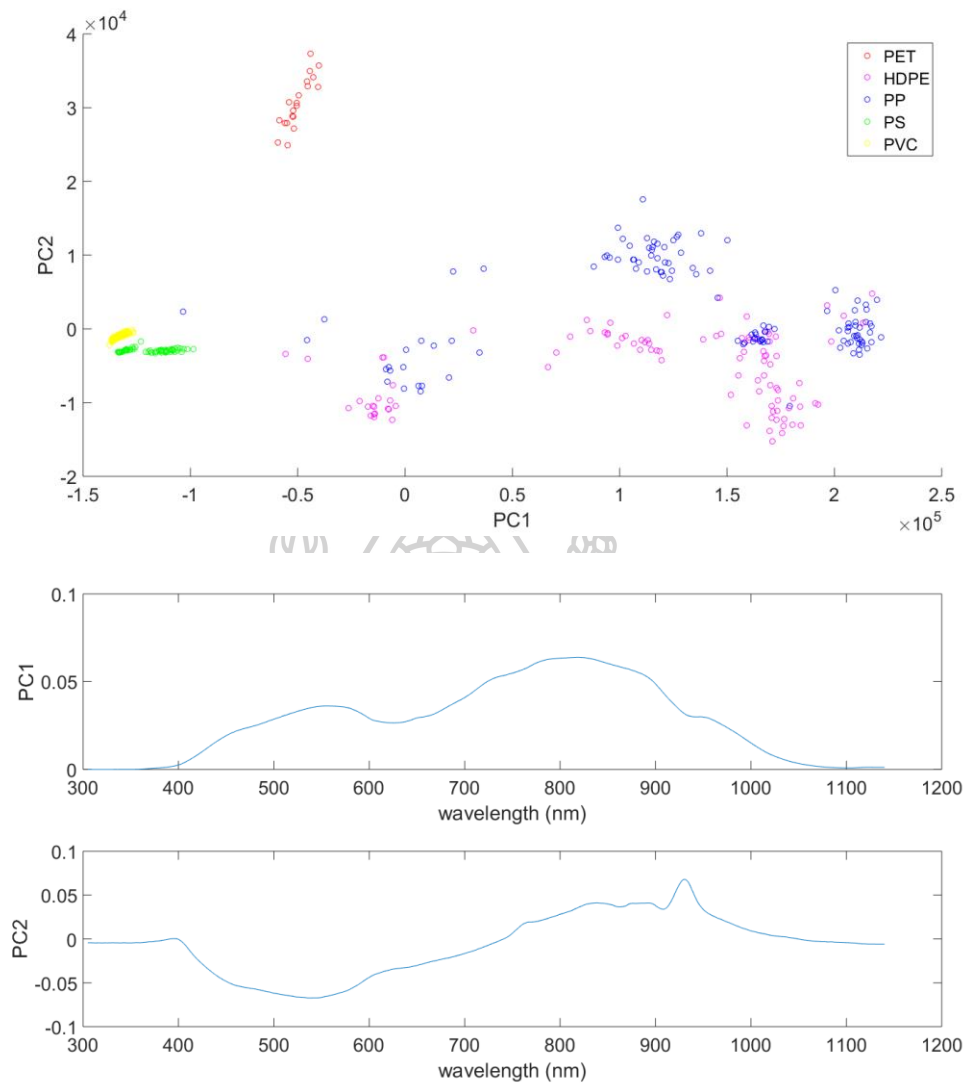
4.3 การสร้างแบบจำลองทำนายค่า PC เพื่อใช้ในการแยกกลุ่ม และ ประสิทธิภาพในการแยก

4.3.1 การวิเคราะห์กลุ่มตัวอย่างด้วยเทคนิค Principle Component Analysis (PCA)

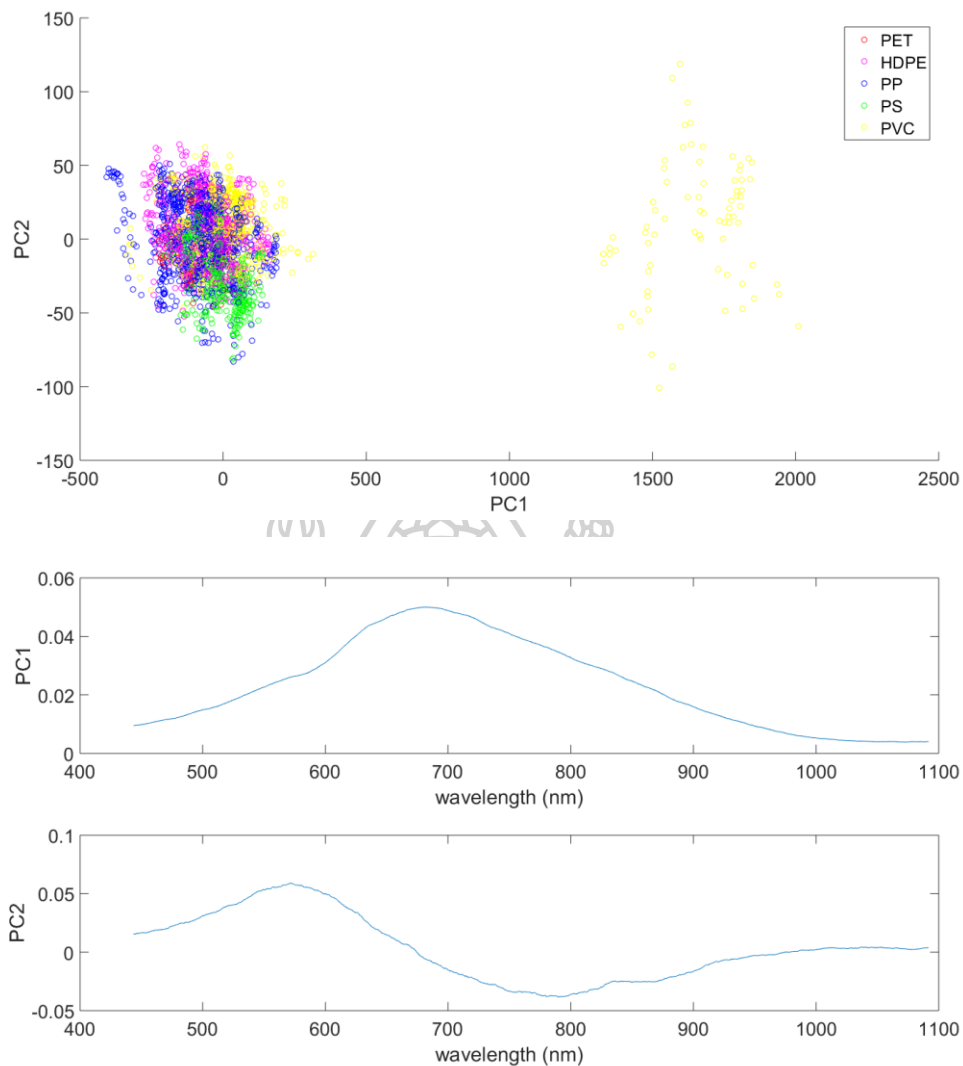
การคัดแยกชนิดพอลิเมอร์บริสุทธิ์

เทคนิค PCA เป็นการวิเคราะห์การกระจายตัว การจัดกลุ่ม จากผลการคูณกันของโหนดดึงที่ได้จากการจำแนกพีคของตัวโปรแกรมกับสเปกตรัมของพอลิเมอร์ โดยจะเริ่มจากการคัดแยกพอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้ง 5 ชนิด ที่มีความหนา และลักษณะผิวแตกต่างกัน ผลการวิเคราะห์เครื่อง Multispectrometer ปรากฏว่า พอลิเมอร์กระจายตัวออกเป็น 4 กลุ่ม ดังภาพที่ 20 คือ PET, PS, PVC และ HDPE ปนกับ PP เมื่อพิจารณาโหนดดึง โดยการพิจารณาโหนดดึงจะพิจารณาทั้งพีคที่มีค่าบวก และค่าติดลบ จะพบว่า PC1 ให้ความสำคัญกับพีคที่ 450, 530 และ 800 นาโนเมตร PC 2 ให้ความสำคัญไปที่ 760, 840, 870 และ 930 นาโนเมตร แล้วลดความสำคัญช่วง 400-600 นาโนเมตรลง ซึ่งจะเห็นว่า พีคที่ PC2 ให้ความสำคัญคือ พีคโอเวอร์โทนลำดับ 4 ของ C-H stretching ใน CH₂ ที่ 760 นาโนเมตร พีคของ C-H และ C-C stretching ที่ 840 นาโนเมตร พีคโอเวอร์โทนลำดับ 4 ของ C-H stretching ในวง benzene ที่ 870 นาโนเมตร และพีคโอเวอร์โทนลำดับที่ 4 ของ C-H stretching ใน CH₂ ซึ่งเมื่อกลับไปพิจารณาที่กราฟ PCA ที่ โหนดดึง PC1 พบว่า มีลักษณะคล้ายกับสเปกตรัมดิบของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ ซึ่งหมายความว่าแต่ละชนิดมีการดูดกลืนและสะท้อนกลับแตกต่างกัน สามารถใช้แค่ความเข้มแสงในช่วงความยาวคลื่นนั้นในการแยกกลุ่มพอลิเมอร์ได้ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการแยกกลุ่ม HDPE/PP ออกจาก PS และ PVC ส่วน PET ถูกแยกออกไปอย่างชัดเจนด้วย PC2 แต่พอลิเมอร์อีก 4 ชนิด มีค่า PC2 ที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นถึงการมีพันธะ หรือหมู่ฟังก์ชันรูปแบบเดียวที่ที่ปริมาณเท่าๆ กัน

ส่วนผล PCA ของเครื่อง NIR line scan 1b ในภาพที่ 21 ไม่สามารถแยกพอลิเมอร์แต่ละชนิดออกจากกันได้ แต่มี PVC กลุ่มหนึ่งที่ถูกแยกออกมาอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาคู่กับโหนดดึงของกราฟนี้ จะเห็นว่า โหนดดึง PC1 จะพิจารณาให้ความสำคัญกับพีคที่ 690 นาโนเมตร PC2 ที่ 580 และลดความสำคัญของพีค 790 นาโนเมตรลง พิจารณาที่ PC1 จะเห็นว่า มี PVC กลุ่มหนึ่งที่ถูกแยกออกมาจากกลุ่มอย่างชัดเจน ส่วน PC2 ไม่สามารถทำให้เกิดส่วนที่เด่นชัดหรือลดลงได้อย่างชัดเจน กลุ่มของพอลิเมอร์ทั้งหมดจึงอยู่บริเวณเดียวกันในช่วง -50 ถึง 50



ภาพที่ 20 PCA และ loading ของการคัดแยกพอลิเมอร์บริสุทธิ์ของเครื่อง
Multispectrometer

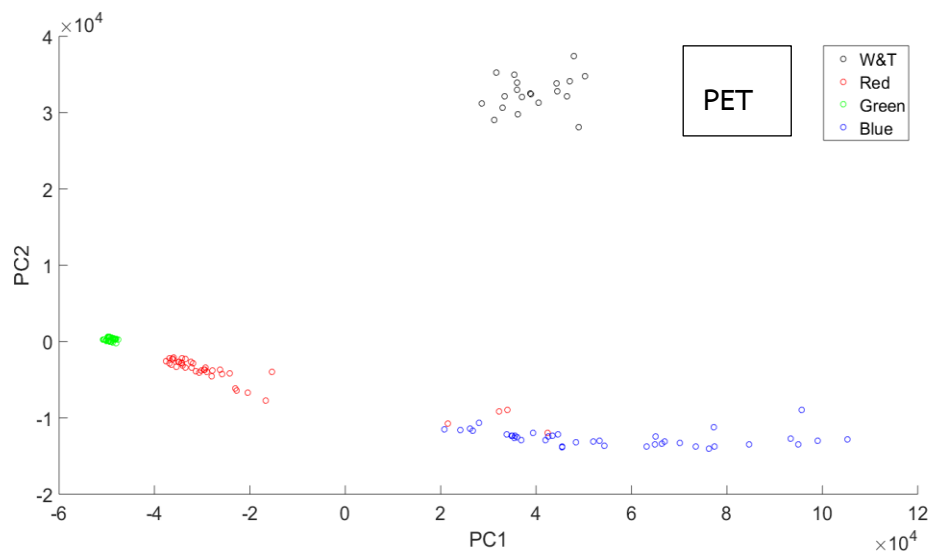


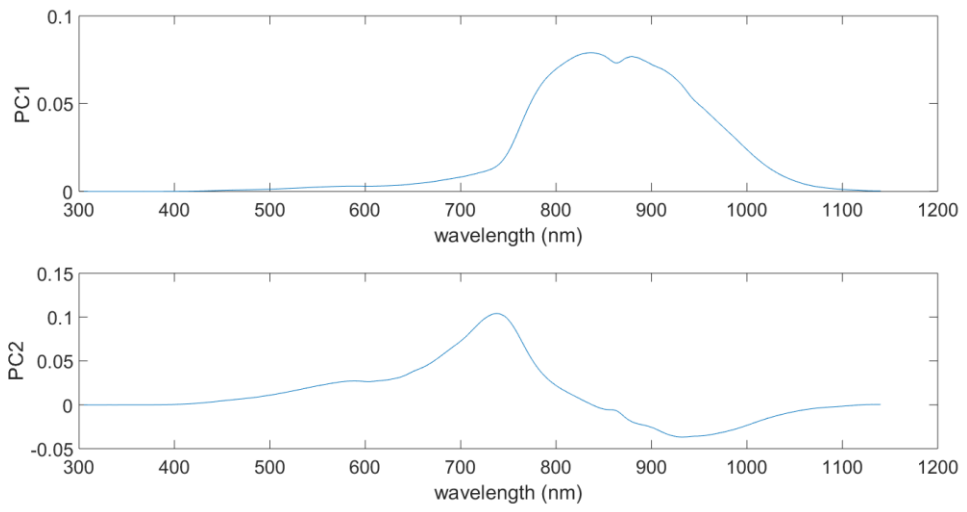
ภาพที่ 21 PCA และ loading ของการคัดแยกพอลิเมอร์บริสุทธิ์ของเครื่อง NIR line scan การคัดแยกพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่สีต่างกัน

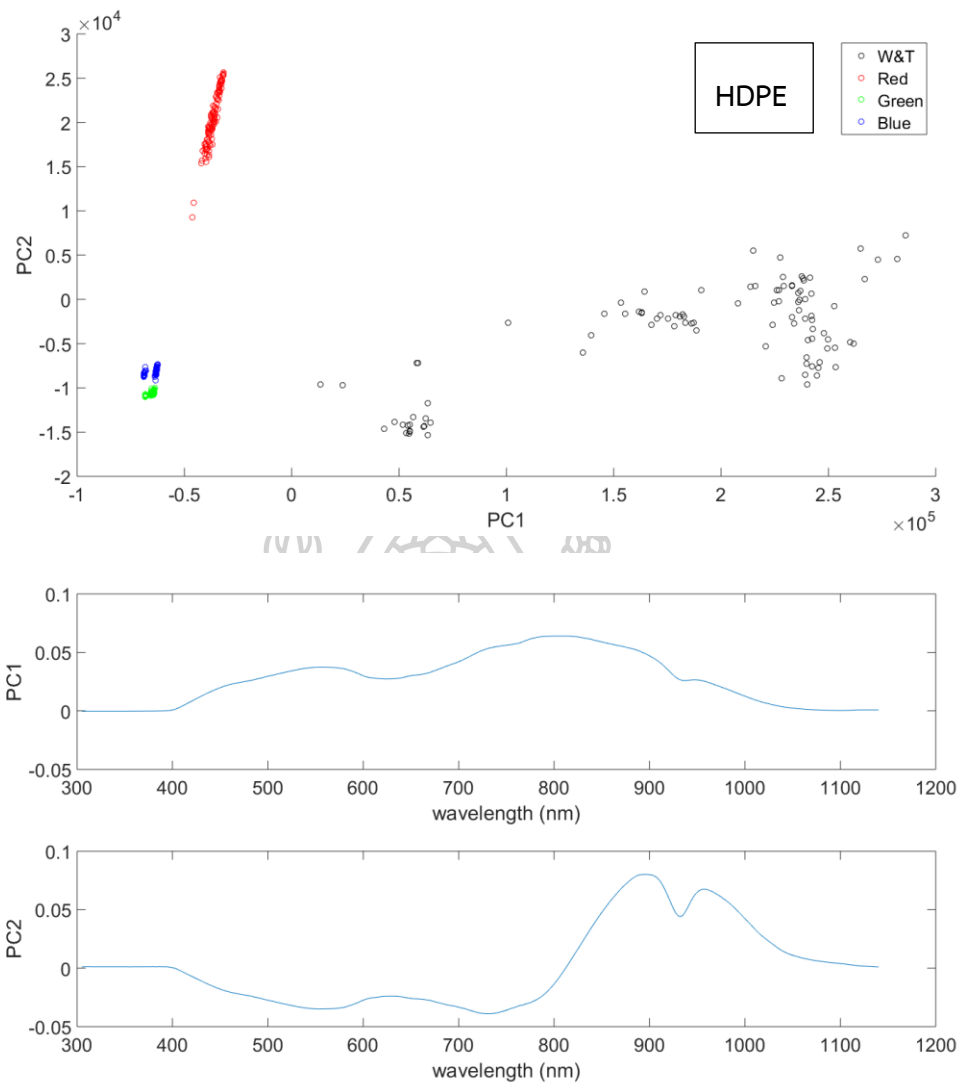
การทดสอบการคัดแยกสีด้วยเทคนิค PCA เพื่อศึกษาผลกระทบของสีในช่วง visible light แต่พบว่า สเปกตรัมที่เครื่อง multispectrometer วัดได้จากชิ้นงานสีซึ่งไม่มีส่วนที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ แต่มีพีคปรากฏในช่วงความยาวคลื่น 700-1000 นาโนเมตร ซึ่งต่างจากชิ้นงานบริสุทธิ์อย่างชัดเจน เนื่องจากชิ้นงานมีความทึบแสงที่เกิดจากการเติมเม็ดสีเข้าไปทำให้แสงในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตรไม่สามารถทะลุผ่าน แสดงให้เห็นว่าสีของชิ้นงานมีผลกับวิธี one point scan ในแง่ของความทึบแสง และเม็ดสีที่เติมลงไปก็มีผลกับสเปกตรัมในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ จากตัวอย่างที่เลือกมา คือ PET และ HDPE ในภาพที่ 22 แสดงให้เห็นว่า เมื่อสีของตัวอย่างต่างกันจะถูกพิจารณาเป็นคนละกลุ่ม เกิดการจากที่โหลดดึง PC1xPC2 ซึ่งจะเห็นว่า โดยที่โหลดดึง PC1 ของ PET ให้ความสำคัญกับพีค 840 นาโนเมตร ของ C-H และ C-C

stretching และ 890 นาโนเมตร เมื่อนำไปคูณกับสเปกตรัมทั้งหมด จะเห็นว่า สีเขียวกับสีแดงที่ไม่มีพีคดังกล่าวเลยจะมีค่าน้อยกว่า 0 ในแกน PC1 แต่อาจมีพีคใกล้เคียงที่ต่างกันไป จึงสามารถแยกทั้ง 2 สีออกจากกันได้ ส่วนสีน้ำเงินมีทั้ง 2 พีคนี้ และแม้จะไม่เห็นพีคนี้ชัดเจนบนสเปกตรัมของพอลิเมอร์บริสุทธิ์แต่เมื่อถูกคูณด้วยค่าโหนดจึงทำให้ถูกจัดไปอยู่บริเวณที่มีค่ามากกว่า 0 จากนั้นพิจารณาต่อที่โหนด PC2 ซึ่งให้ความสำคัญกับพีค 746 นาโนเมตร ซึ่งเป็นพีคโอเวอร์โทนลำดับที่ 4 ของพันธะ C-H ใน CH_2 ของแอลคิลพีคที่ 913 นาโนเมตร ซึ่งเป็นของของโอเวอร์ลำดับ 3 ของพันธะ CH_2 เมื่อพอลิเมอร์บริสุทธิ์มีพีคดังกล่าวชัดเจนกว่า จึงไปอยู่ที่ตำแหน่งบนของกราฟ ต่อมาเป็น HDPE ที่โหนด PC1 ให้ความสำคัญไปที่ช่วง 400-600 นาโนเมตร และช่วง 700-900 นาโนเมตร ซึ่งสเปกตรัมพอลิเมอร์บริสุทธิ์มีพีคเหล่านี้มาก จึงมีการกระจายตัวไปทางขวาของกราฟ ส่วนโหนด PC2 ลดความสำคัญช่วง 400-600 และ 700-800 นาโนเมตรลง แล้วให้ความสำคัญกับพีค 900 และ 960 นาโนเมตร จึงสามารถแยกกลุ่มสีแดง น้ำเงิน และเขียวได้

ผลการวิเคราะห์การแยกสีด้วยเครื่อง Multispectrometer พบว่าสามารถแยกกลุ่มสีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดออกจากกันได้ แสดงว่าตัวเม็ดสี (pigment) ส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 400-1000 นาโนเมตร และโหนดของทั้ง 2 ชนิดไม่สามารถเอาไปแทนกันได้รวมไปถึงไม่สามารถนำไปใช้กับการคัดแยกอื่นๆได้

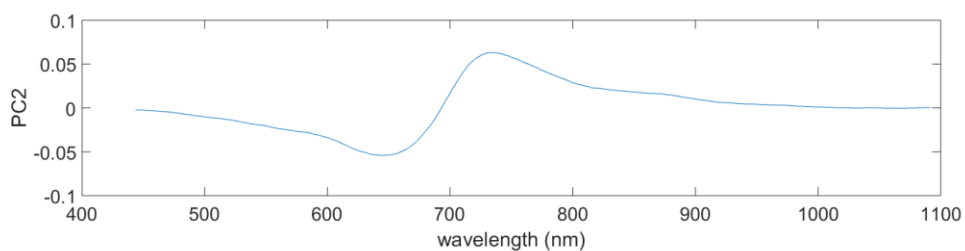
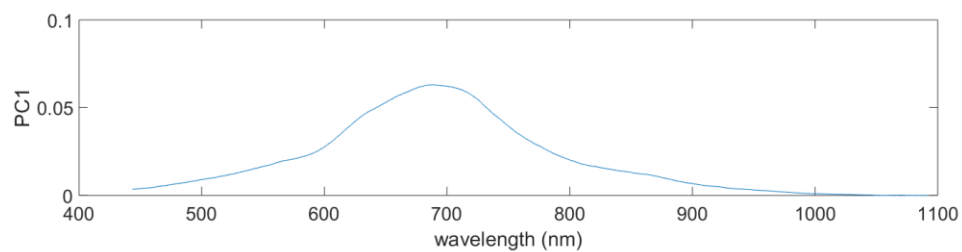
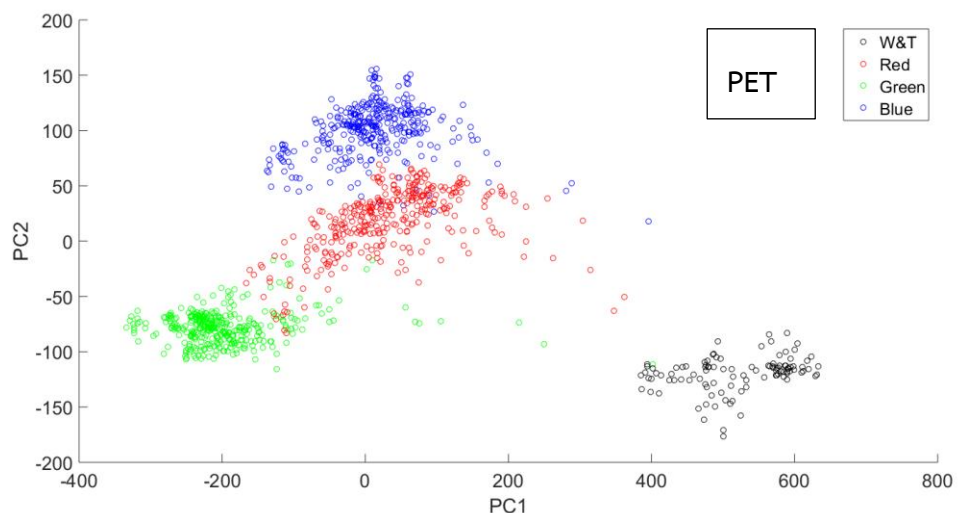


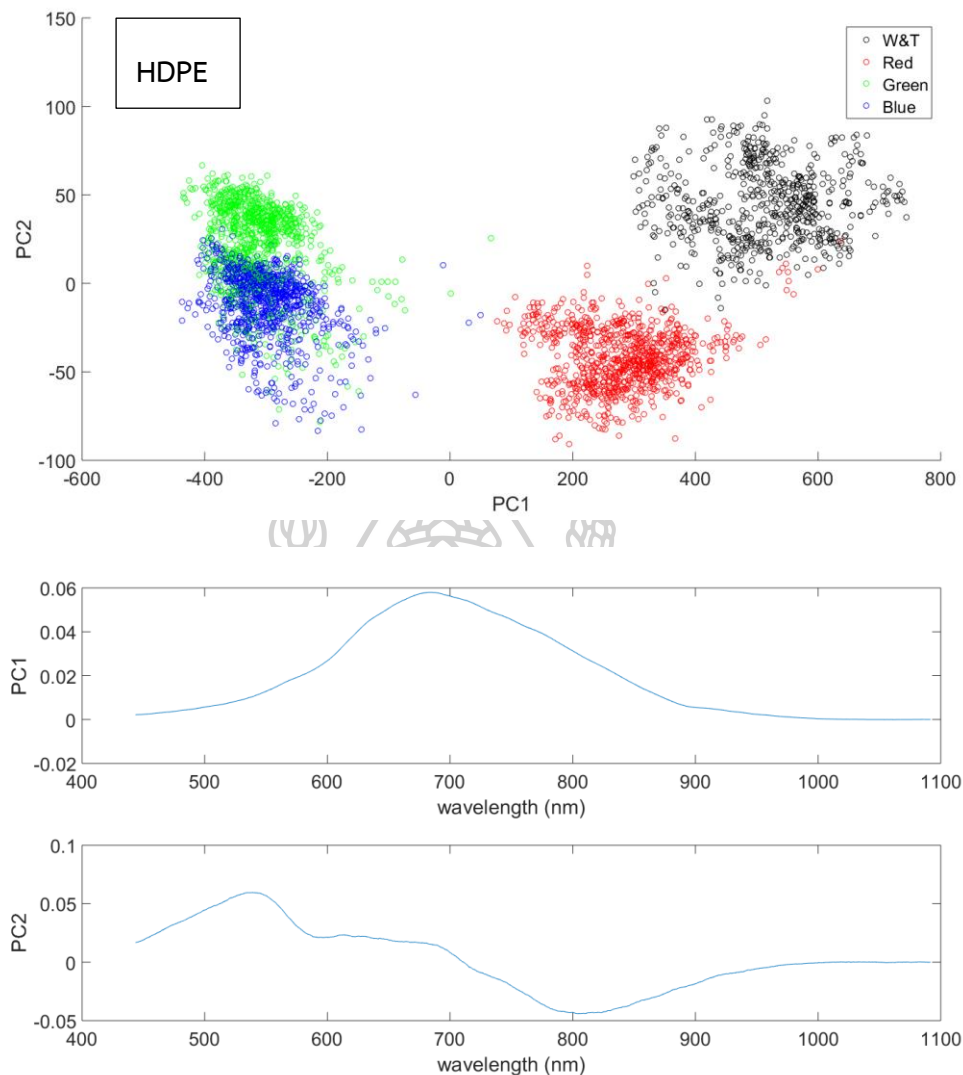




ภาพที่ 22 PCA และ loading ของการคัดแยกสี PET และ HDPE ของเครื่อง Multispectrometer

ในส่วนเครื่อง Line scan Ib ให้ผลการทดลองในลักษณะเดียวกัน คือ สีมี่ผลต่อการแยกชนิดของพอลิเมอร์ แต่ให้การทดลองในลักษณะที่ต่างออกไปอย่างเชิง ในภาพที่ 23 โหลดติงที่ทำการวิเคราะห์นี้ให้ความสำคัญจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400-1000 นาโนเมตร โดยในส่วนของ PET โหลดติง PC1 ให้ความสำคัญไปที่พีค 690 นาโนเมตร โหลดติง PC2 ให้ความสำคัญที่ 746 นาโนเมตร เป็นพีคของโอเวอร์โทนลำดับที่ 4 ของพันธะ C-H ใน CH_2 และลดช่วง 400 นาโนเมตร ไปจนถึง 650 นาโนเมตรลง เมื่อนำไปคูณสเปกตรัม ทำให้กลุ่มพอลิเมอร์บริสุทธิ์แยกตัวออกมาจากกลุ่มพอลิเมอร์สีจาก PC1 อย่างเห็นได้ชัด ส่วน PC2 จะส่งผลกับการแยกกลุ่มพอลิเมอร์แต่ละสี เพราะสเปกตรัมของชิ้นงานแต่ละสีมีบริเวณช่วง 400-700 นาโนเมตร ที่ต่างกัน ส่วน HDPE โหลดติง PC1 จะให้ความสำคัญกับพีค 690 นาโนเมตร กลุ่มพอลิเมอร์บริสุทธิ์และกลุ่มสีแดงจึงถูกแยกออกไปทางขวาของกราฟ PCA โหลดติง PC2 ให้ความสำคัญกับพีค 535 นาโนเมตร ลดพีค 800 นาโนเมตรลง กลุ่มสีเขียวจึงอยู่สูงกว่ากลุ่มสีแดง และสีน้ำเงิน

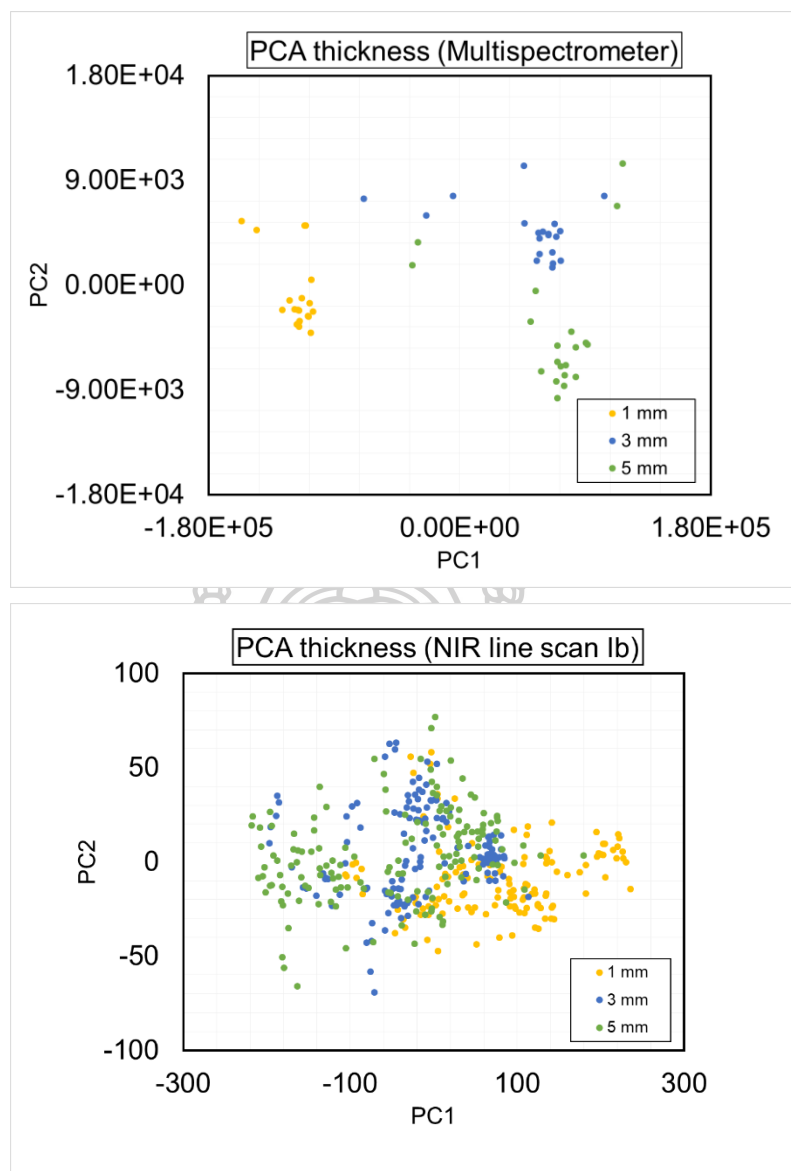




ภาพที่ 23 PCA และ loading ของการคัดแยกสี PET และ HDPE ของเครื่อง NIR line scan การคัดแยกพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่มีความหนาของชิ้นงานต่างกัน

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCA สอดคล้องกับสเปกตรัมดิบที่ได้ ดังแสดงในภาพที่ 24 คือ ความหนาของชิ้นงานมีผลต่อความเข้มแสงที่สะท้อนออกมา ส่งผลให้แต่ละความหนาถูกจัดแยกกลุ่มกัน

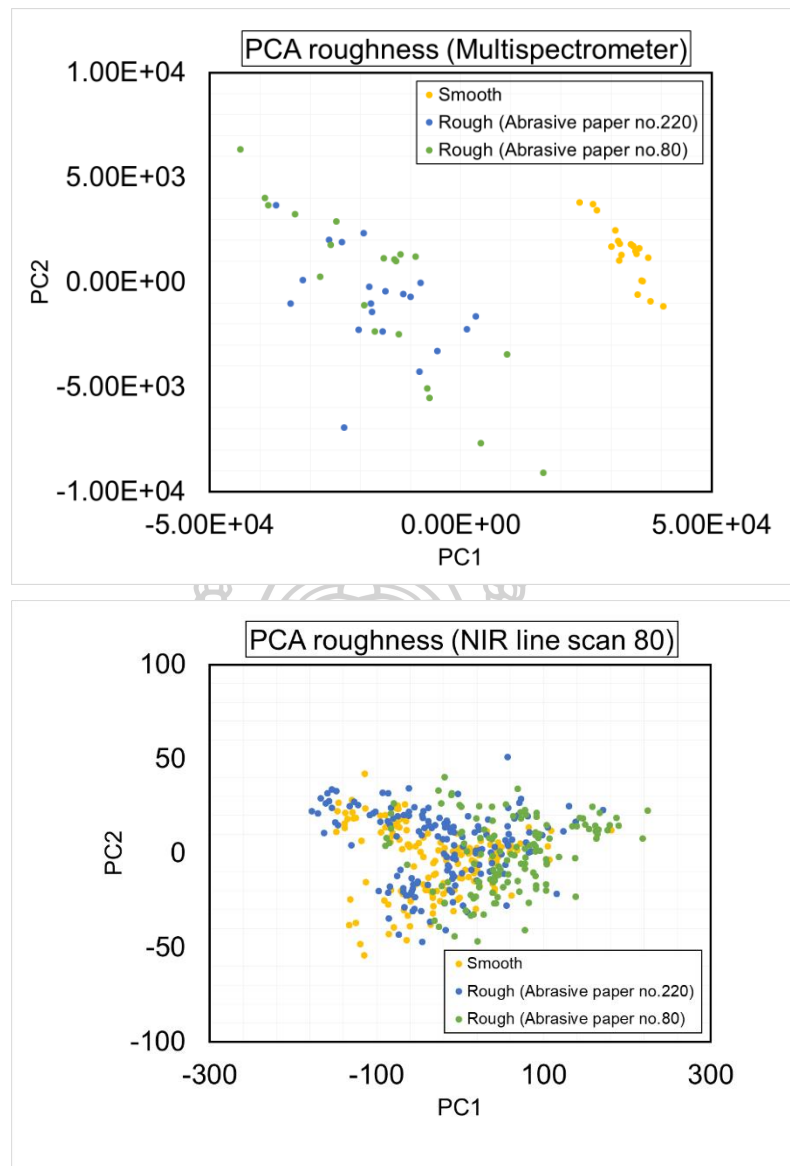
ผลกระทบของความหนาของชิ้นงานมีผลต่อการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCA ของเครื่อง Line scan lb ด้วยเช่นกัน แต่ยังไม่ชัดเจนเท่าผลจากเครื่อง Multispectrometer แต่หากผลต่างของขนาดความหนาขนาดความหนามากขึ้นก็น่าจะมีผลกระทบมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 24 PCA ของพอลิเมอร์ที่มีความหนาต่างกัน

การคัดแยกพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่มีลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานต่างกัน

ผลของสเปกตรัมจากเครื่อง Multispectrometer เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCA แล้ว จะเห็นว่า ผิวของชิ้นงานมีผลต่อการแบ่งกลุ่ม โดยจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มผิวเรียบ และกลุ่มผิวขรุขระ ผลจากเครื่อง NIR line scan Ib จะไม่เห็นความแตกต่างระหว่างผิวเรียบกับผิวขรุขระ ดังแสดงในภาพที่ 25

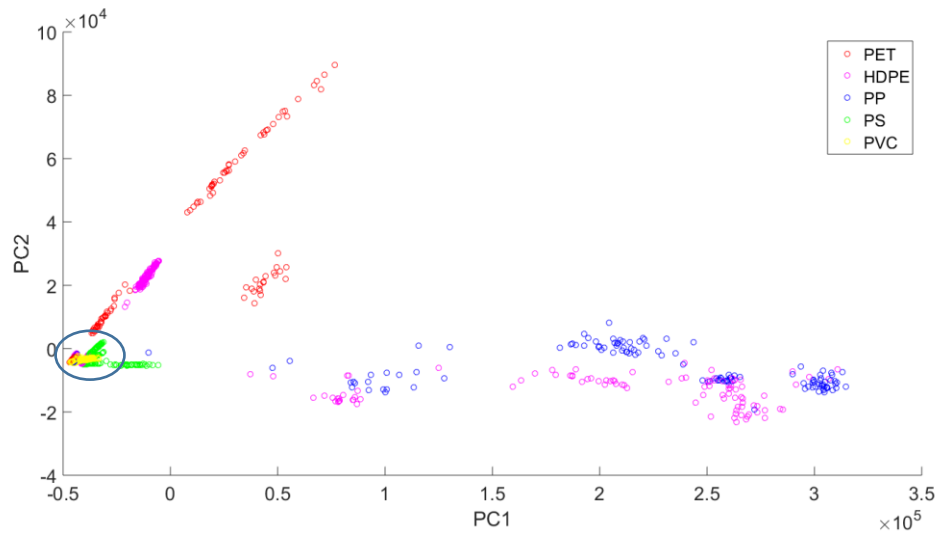


ภาพที่ 25 PCA และ loading ของพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่มีลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานต่างกัน

การตัดแยกพอลิเมอร์โดยรวมทุกเงื่อนไขเข้าด้วยกัน

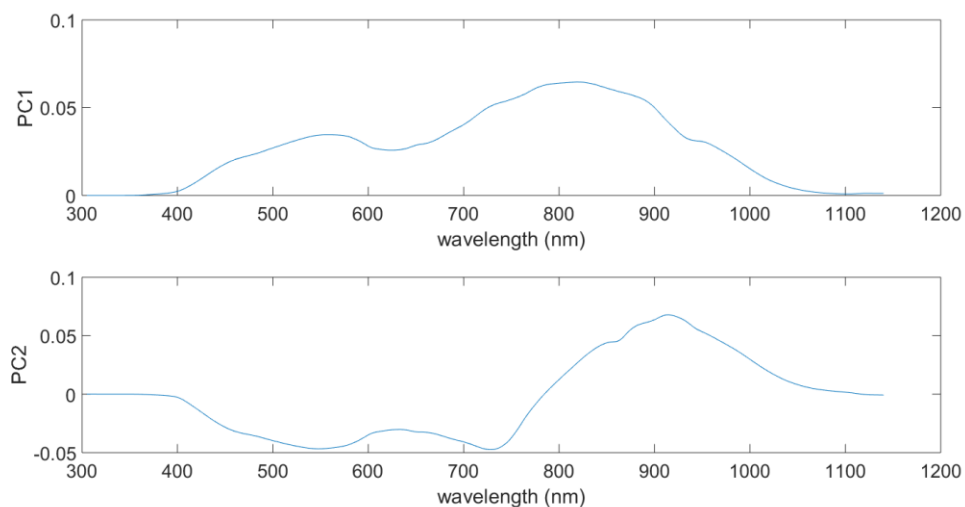
เมื่อศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมและการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCA แล้ว ในขั้นตอนสุดท้ายของการศึกษาจึงเป็นการรวมทุกตัวอย่างที่มี คือ พอลิเมอร์บริสุทธิ์ พอลิเมอร์ผสมสี ที่มีความหนา และลักษณะผิวต่างกัน เพื่อมาพิจารณาร่วมกันเป็นกรณีตัวอย่างของการตัดแยกขยะจริงที่จะมีสีสันต่างกัน รูปร่าง ขนาด ความหนา และพื้นผิวชิ้นงานที่ต่างกันด้วยเทคนิค PCA ในภาพที่ 26 ผลของเครื่อง Multispectrometer เมื่อไม่ทำการปรับปรุงสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์สามารถแยกกลุ่มพอลิเมอร์ได้เพียงเล็กน้อย คือ PET บริสุทธิ์ และ กลุ่มของ HDPE กับ PP บริสุทธิ์ที่

ปะปนกันอยู่ แต่ที่เหลือไม่สามารถแยกกลุ่มออกมาได้ ซ้ำยังรวมกันเป็นบริเวณเล็กๆ จะไม่สามารถคัดแยกตัวอย่างทั้งหมดพร้อมกันได้ สังเกตจากการกระจุกตัวของการตัวอย่างที่ด้านซ้ายของกราฟ ซึ่งเป็นของชิ้นงานที่ผสมสีเกือบทั้งหมด



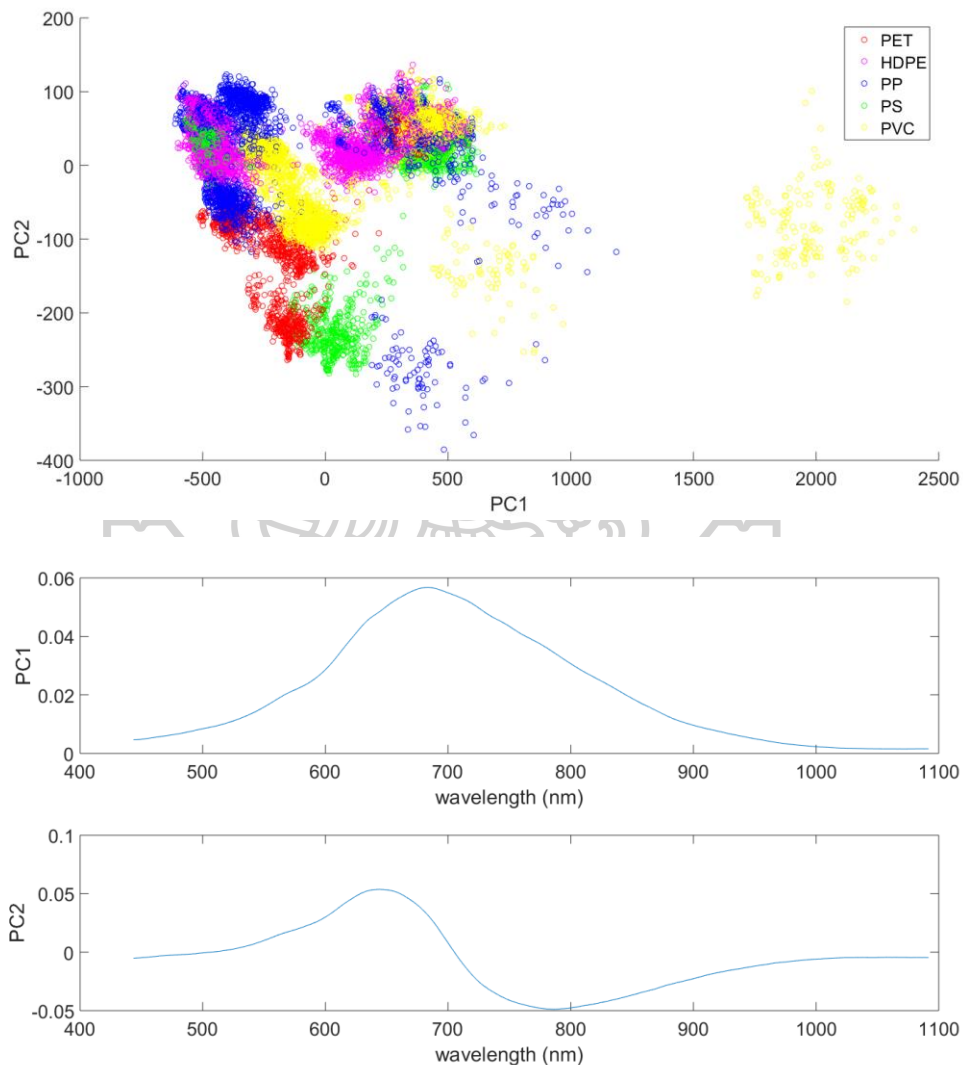
ภาพที่ 26 PCA ของ Multispectrometer

เมื่อพิจารณาที่โหลดดังในภาพที่ 27 จะพบว่า แตกต่างจากการคัดแยกทั้งหมดก่อนหน้านี้ โดย PC1 พิจารณาเต็มช่วงความยาวคลื่นของสเปกตรัมที่วัดได้ ซึ่งโหลดดัง PC1 เป็นตัวที่ทำให้แยกออกมาได้ HDPE PP PS และ PET บริสุทธิ์ออกมาได้บางส่วน PC2 จะเน้นที่พีค 840 นาโนเมตร ของ C-H stretching และ C-C stretching และ 913 ซึ่งเป็นพีคโอเวอร์โทนลำดับที่ 3 ของ C-H stretching ของ CH₂ ซึ่งทั้ง 2 พีคนี้มีอยู่ในพอลิเมอร์ทุกชนิดจึงไม่สามารถแยกชนิดของพอลิเมอร์ทั้ง 5 ออกมาได้ ลดพีคในช่วง 400-700 นาโนเมตรลง ทำให้กลุ่มที่เป็นพอลิเมอร์สีทั้งหมดไปรวมกันที่จุดเดียว



ภาพที่ 27 โหลดดังของ PCA ของ Multispectrometer

ส่วนผลการวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยเทคนิค PCA ของเครื่อง NIR line scan 1b .ในภาพที่ 28 ผลปรากฏว่า เมื่อไม่ทำการปรับปรุงสเปกตรัมจะไม่สามารถแยกกลุ่มพอลิเมอร์แต่ละชนิดออกจากกันได้เช่นกัน มีเพียงกลุ่มของ PVC บางส่วนที่ถูกแยกออกมาอย่างชัดเจนดังเช่นการวิเคราะห์พอลิเมอร์บริสุทธิ์ ส่วนกลุ่มพอลิเมอร์ที่ยังคงปะปนกัน เมื่อไปพิจารณาที่กราฟโหลดติง พบว่า พีคที่ถูกนำมาพิจารณาใน PC1 คือ 690 นาโนเมตร ซึ่งเป็นพีคที่มีผลอย่างมากกับชิ้นงานสีขาว ส่วน PC2 จะพิจารณาเพิ่มที่ 630 นาโนเมตร แล้วไปลดที่ 780 นาโนเมตร เมื่อนำไปวิเคราะห์อย่างละเอียดด้วยโปรแกรม Unscrambler พบว่า เป็นกลุ่ม PVC ผิวเรียบที่ถูกแยกออกมาอย่างชัดเจน ส่วนกลุ่มผิวขรุขระมีส่วนที่แยกได้ แต่ยังคงอยู่ติดกับกลุ่มอื่นๆ



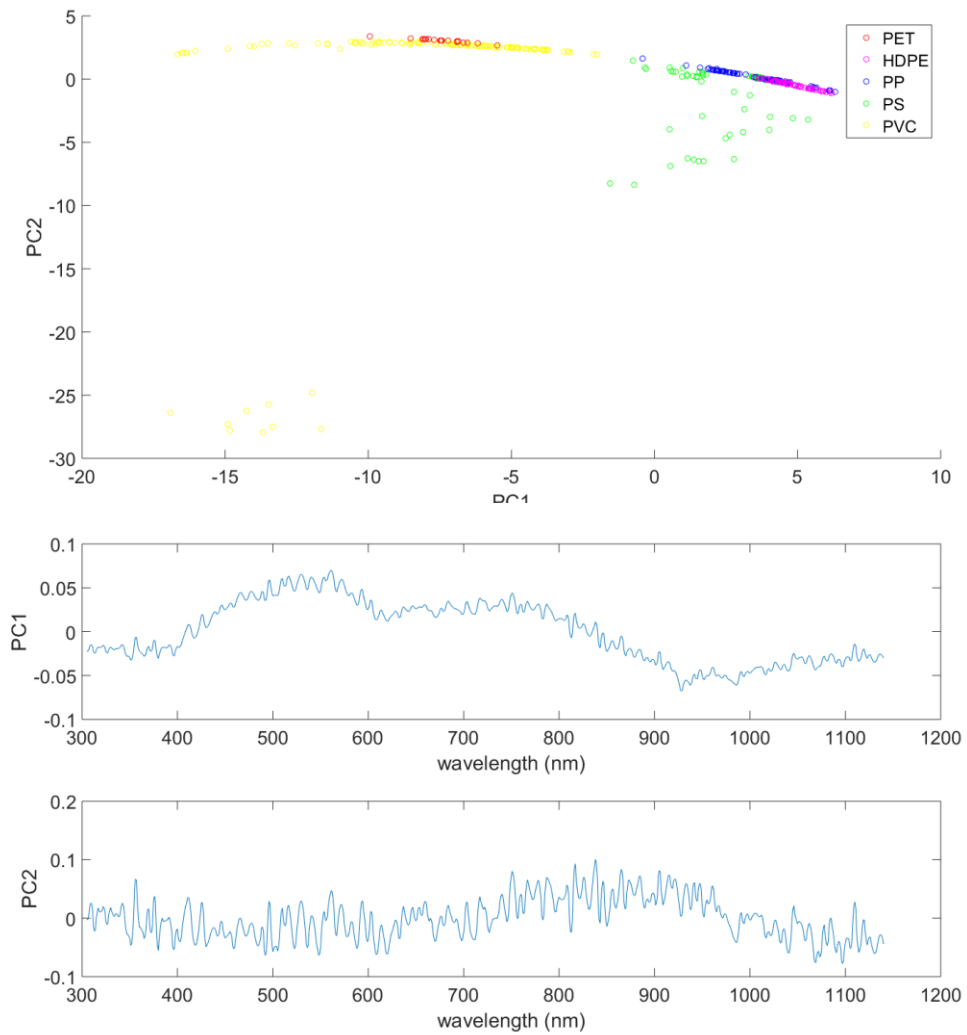
ภาพที่ 28 PCA และ loading จากเครื่อง NIR line scan ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสเปกตรัมขั้นที่ 2

4.3.2 PCA (MPA, Multispectrometer, NIR LineScan Ia, NIR LineScan Ib) หลังการปรับปรุงสเปกตรัม

การคัดแยกชนิดพอลิเมอร์บริสุทธิ์

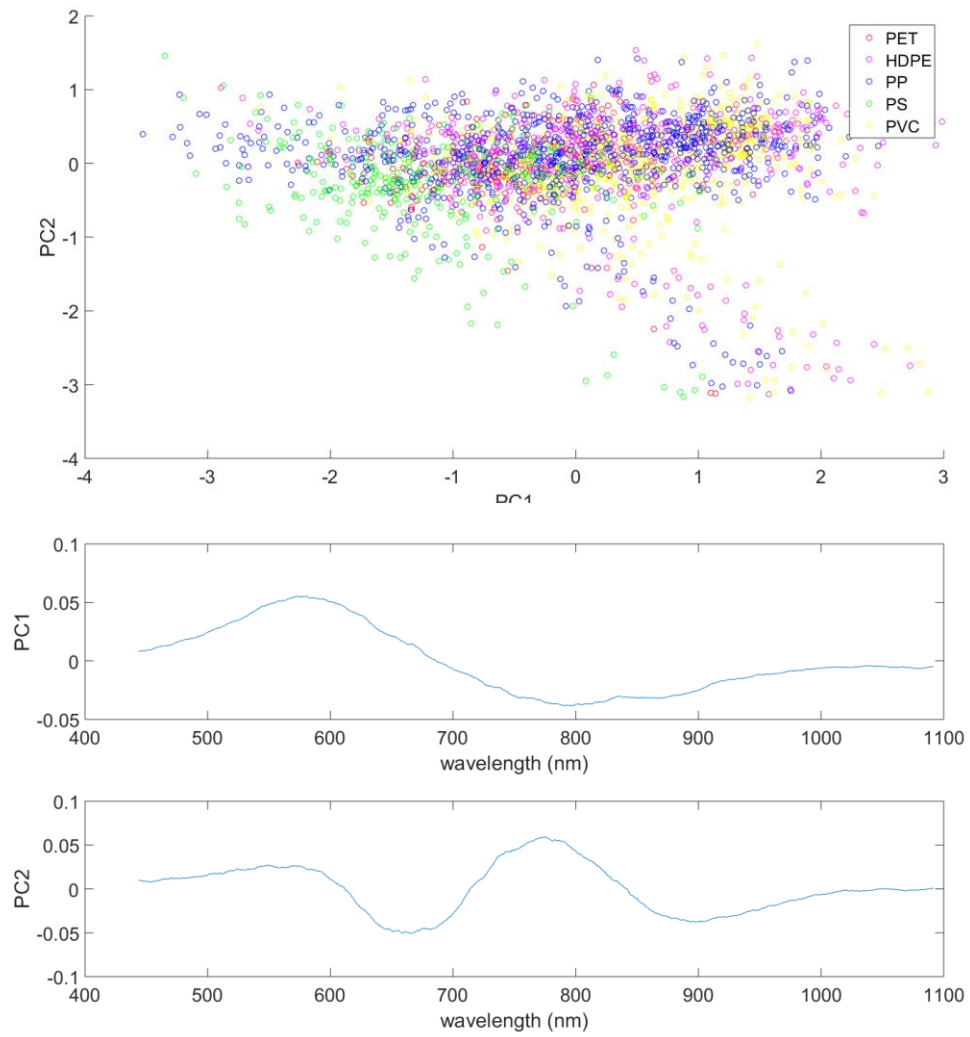
เมื่อทำการปรับปรุงสเปกตรัมด้วยวิธีการต่างๆ จะทำให้ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCA เปลี่ยนแปลงไป ดังในภาพที่ ผล PCA ของเครื่อง Multispectrometer ที่ไม่ได้ปรับปรุงสเปกตรัมสามารถแยกชนิดพอลิเมอร์เป็น 5 กลุ่มได้ แต่เมื่อปรับปรุงสเปกตรัมด้วยวิธี SNV แล้วกลับไม่สามารถแยกกลุ่มได้ดังเดิม เนื่องจากพีคหลักที่เคยใช้แยกความแตกต่างเมื่อไม่ปรับปรุงสเปกตรัม คือ ที่ 690 นาโนเมตร เมื่อทำการ SNV ไปแล้ว พีคดังกล่าวไม่มีความแตกต่างกันดังเดิม ซึ่งในที่นี้โหนดตั้ง PC1 ให้ความสำคัญไปที่ช่วง 400-600 นาโนเมตร แล้วให้ความสำคัญกับช่วง 600-800 นาโนเมตรรองลงมา แล้วไปลดความสำคัญช่วง 900-1000 นาโนเมตร ส่วนโหนดตั้ง PC2 จะให้ความสำคัญที่ช่วง 800-1000 นาโนเมตรเพียงเล็กน้อย กราฟ PCA จึงมีค่าในแกน PC2 ใกล้เคียงกันมาก ส่วนในแกน PC1 มีการเรียงกันแต่ไม่สามารถแบ่งเป็นกลุ่มได้





ภาพที่ 29 PCA และ loading ของเครื่อง multispectrometer หลังปรับปรุงสเปกตรัมด้วยวิธี SNV

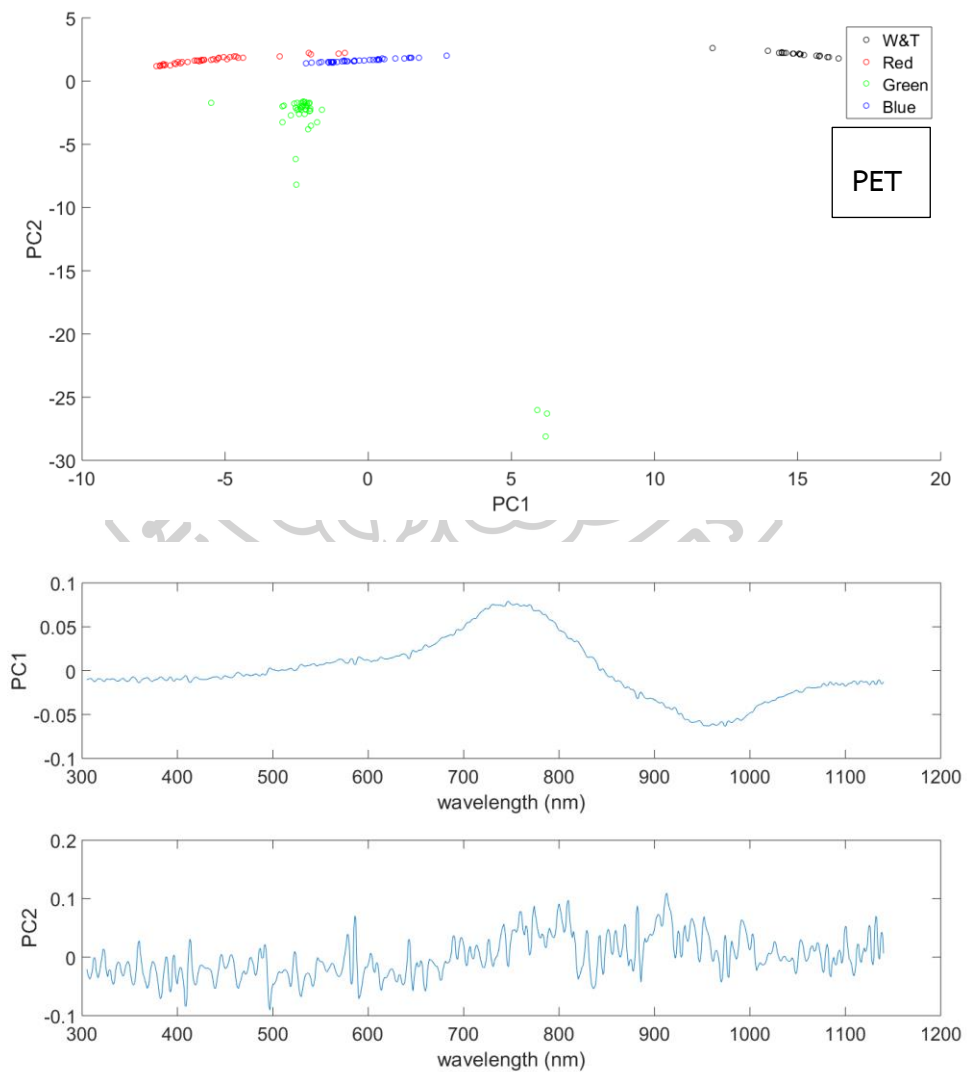
หลังการปรับปรุงสเปกตรัมจากเครื่อง NIR line scan ด้วยวิธี SNV ผลปรากฏว่า ในภาพที่ 30 จากที่เคยแยก PVC ได้กลุ่มหนึ่ง กลายเป็นไม่สามารถแยกกลุ่มชนิดพอลิเมอร์ได้ โดยโหนดดังมีการเปลี่ยนแปลง คือ โหนดดัง PC1 เน้นให้ความสำคัญไปที่ช่วง 400-700 นาโนเมตร แล้วลดช่วง 700-900 นาโนเมตรลง ส่วนโหนดดัง PC2 มีการเพิ่ม 2 ช่วงไม่เท่ากัน คือช่วง 500-600 นาโนเมตร และพีค 790 นาโนเมตร และลดที่ 690 และ 890 นาโนเมตร ซึ่งต่างกับก่อนที่จะปรับปรุงสเปกตรัมด้วยวิธี SNV

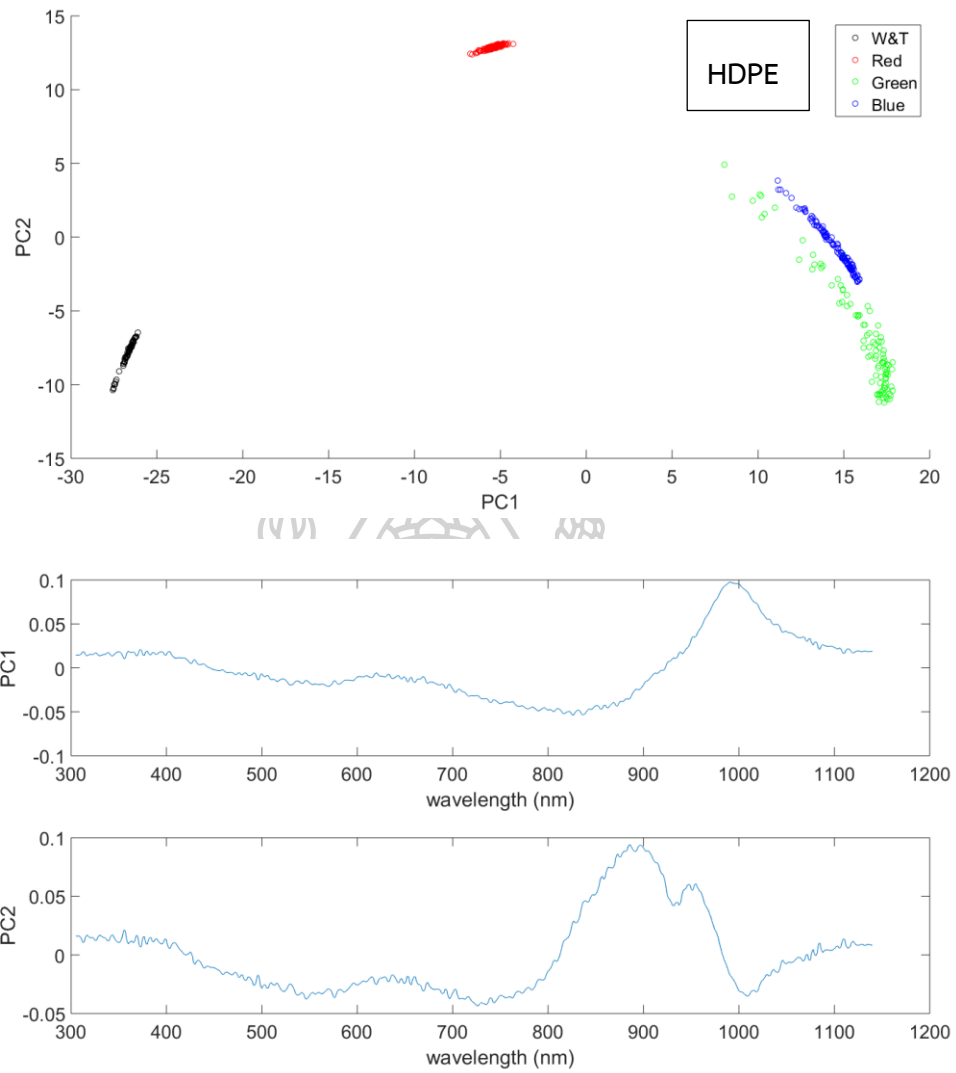


ภาพที่ 30 PCA และโหลดติงของการแยกพอลิเมอร์บริสุทธิ์ หลังปรับปรุงสเปกตรัมด้วยวิธี SNV

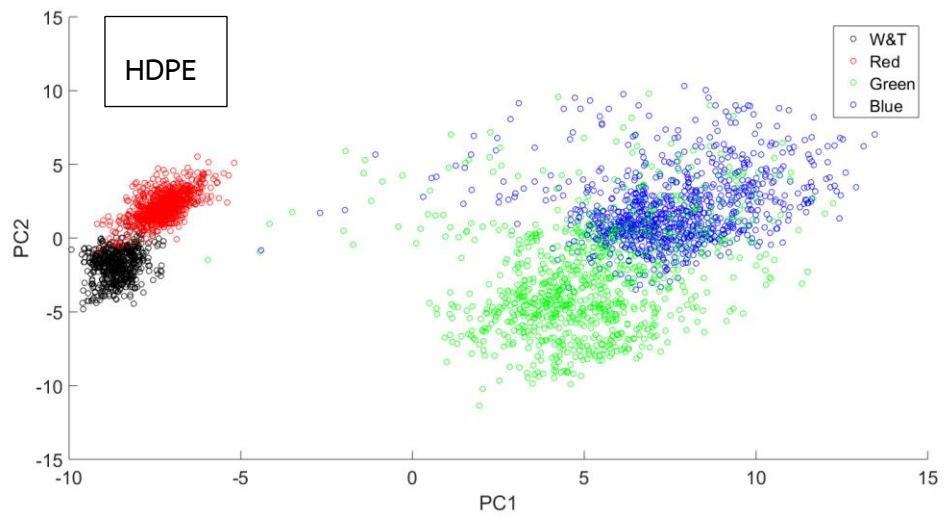
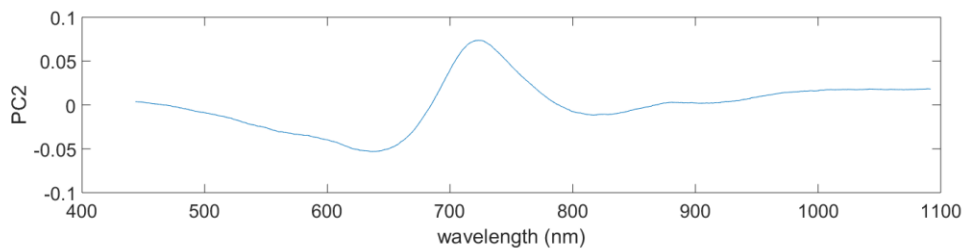
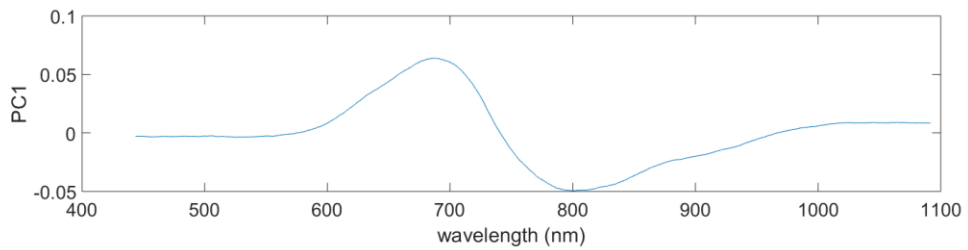
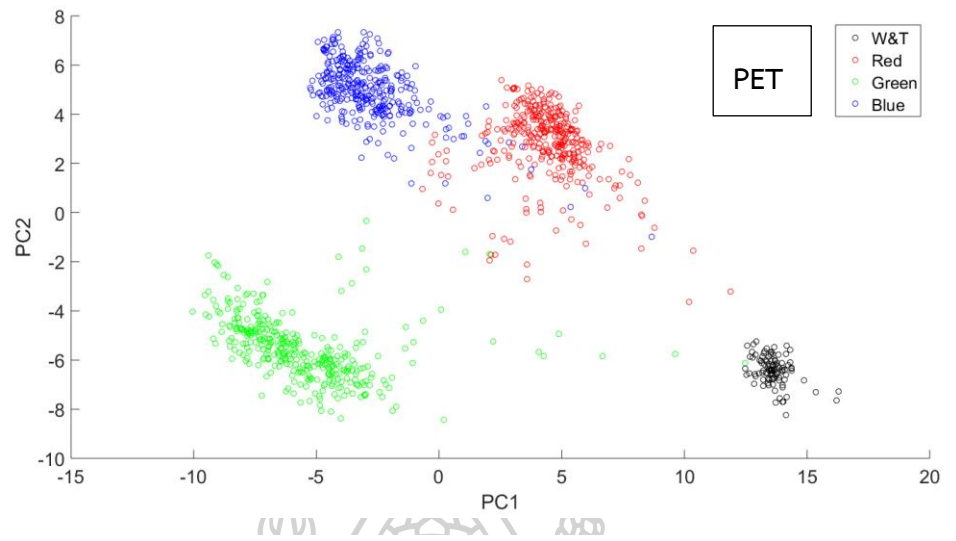
การคัดแยกพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่สีต่างกัน

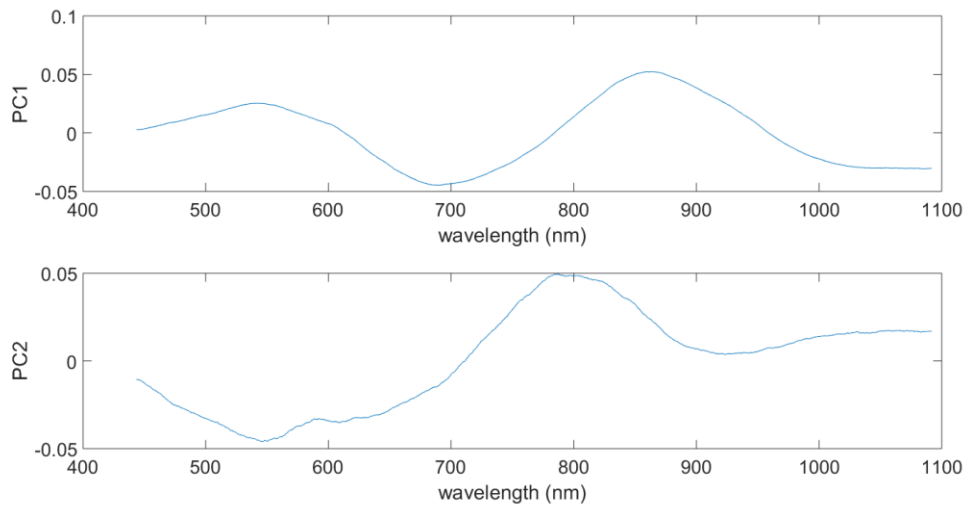
เมื่อปรับปรุงสเปกตรัมด้วยวิธี SNV การคัดแยกพอลิเมอร์สียังคงสามารถทำได้แม้ว่าโหนดดิ่งจะเปลี่ยนแปลงไป แสดงให้เห็นว่าผลกระทบจากเม็ดสีส่งผลต่อการคัดแยกพอลิเมอร์ในช่วงความคลื่น 800-1000 นาโนเมตร โดยหลังจากการปรับปรุงสเปกตรัมแล้ว แต่ละสียังคงอยู่คนละกลุ่ม แต่กลุ่มสีจะอยู่ใกล้กันมากขึ้น ส่วนกลุ่มบริสุทธิ์ยังคงแยกได้อย่างชัดเจนทั้ง PET และ HDPE ดังแสดงในภาพที่ 31 โดย PET จะมีโหนดดิ่ง PC1 คล้ายกับ PC2 ก่อนปรับปรุง คือ เน้นที่พีค 750 นาโนเมตร แล้วลดพีค 970 ลง ส่วน PC2 พิจารณาทั้งสเปกตรัมเป็นสัญญาณรบกวน ส่วน HDPE โหนดดิ่ง PC1 ให้ความสำคัญไปที่พีค 980 นาโนเมตร โหนดดิ่ง PC2 ยังเน้นไปที่พีค 890 และ 940 นาโนเมตรตามเดิม





ภาพที่ 31 PCA และโหลดติงการแยกพอลิเมอร์ที่สีต่างกัน หลังปรับปรุงสเปกตรัมด้วยวิธี SNV ของเครื่อง Multispectrometer

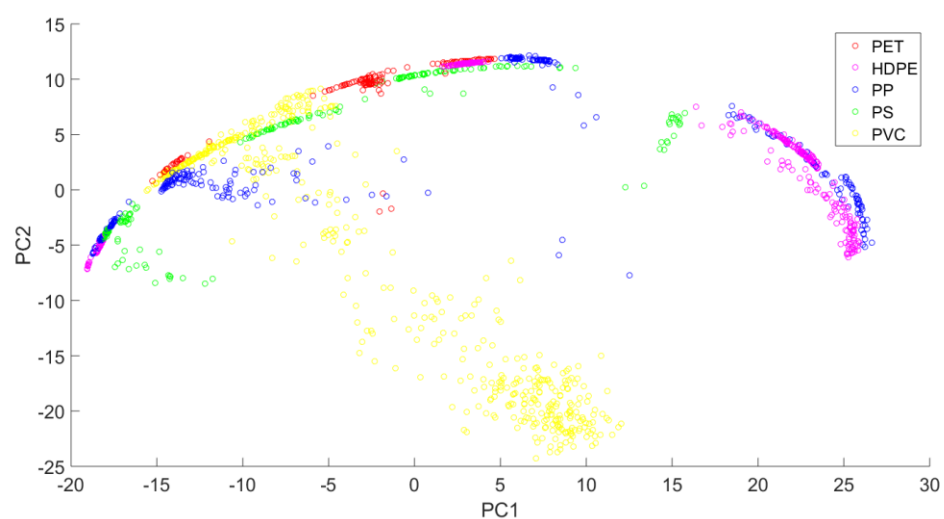


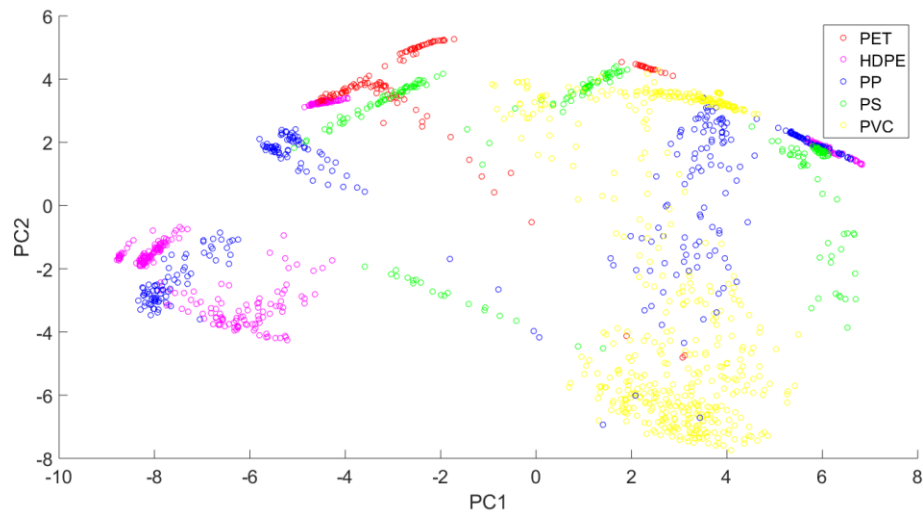


ภาพที่ 32 PCA และโหลดติงการแยกพอลิเมอร์สีต่างกัน หลังปรับปรุงสเปกตรัมด้วยวิธี SNV ของเครื่อง NIR line scan

การคัดแยกพอลิเมอร์โดยรวมทุกเงื่อนไขเข้าด้วยกัน

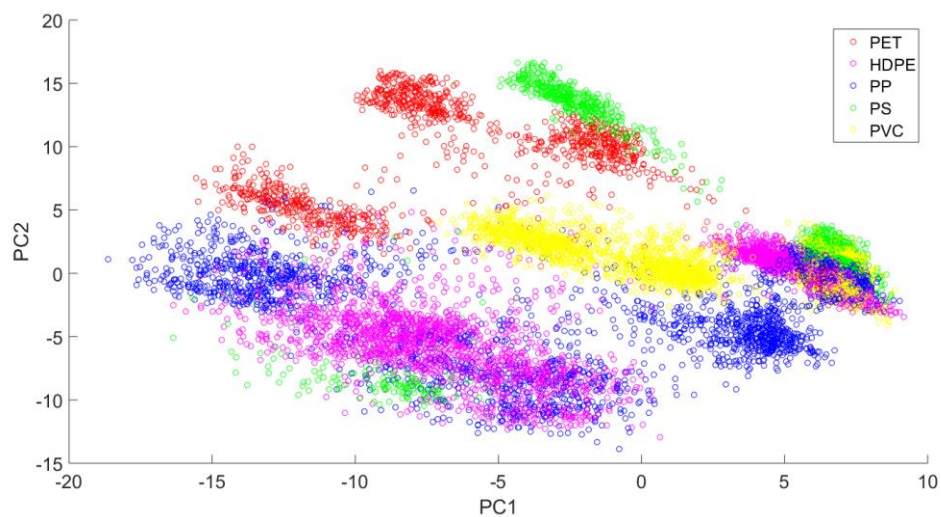
เมื่อทำการปรับปรุงสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCA โดยในภาพที่ 33 เป็นการปรับปรุงสเปกตรัมด้วยเทคนิค SNV และ Normalization ของเครื่อง NIR Multispectrometer ผลปรากฏว่า การปรับปรุงสเปกตรัมทำให้เห็นกลุ่ม PVC ชัดเจนขึ้น และทำให้พอลิเมอร์สีกระจายตัวออกมาได้ แต่ไม่สามารถแบ่งกลุ่มพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ได้ เพราะการปรับปรุงสเปกตรัมด้วยเทคนิค SNV และ Normalization เป็นการปรับเส้นฐานของสเปกตรัม ซึ่งมีผลกับความเข้มแสงเป็นอย่างมาก





ภาพที่ 33 กราฟ PCA ที่ได้จากสเปกตรัมที่ทำการปรับปรุงด้วยวิธี SNV และ Normalization ของเครื่อง Multispectrometer

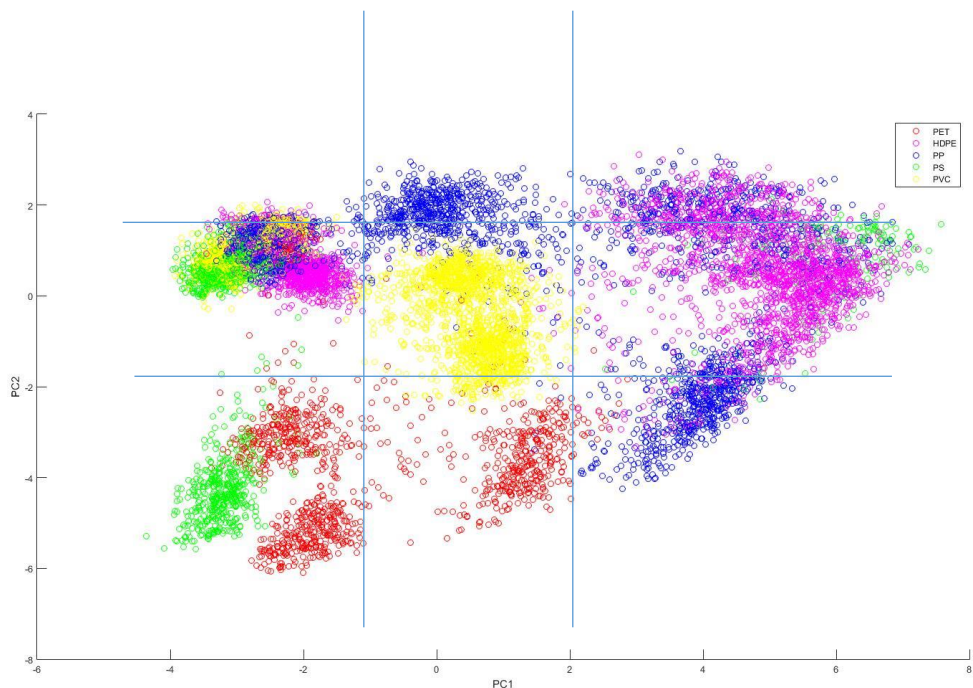
เมื่อไปพิจารณาที่การปรับปรุงสเปกตรัมด้วยวิธี SNV กับสเปกตรัมของเครื่อง NIR line scan lb ในภาพที่ 34 พบว่า กลุ่ม PVC แยกออกมาชัดเจน มากขึ้นอยู่บริเวณตรงกลางกราฟ โดยมีรูปแบบการกระจายตัวที่เปลี่ยนไป แต่ยังมีบริเวณที่พอลิเมอร์หลายชนิดๆ รวมกันอยู่



ภาพที่ 34 กราฟ PCA ของเครื่อง Line scan la ที่ปรับปรุงสเปกตรัมด้วยวิธี SNV

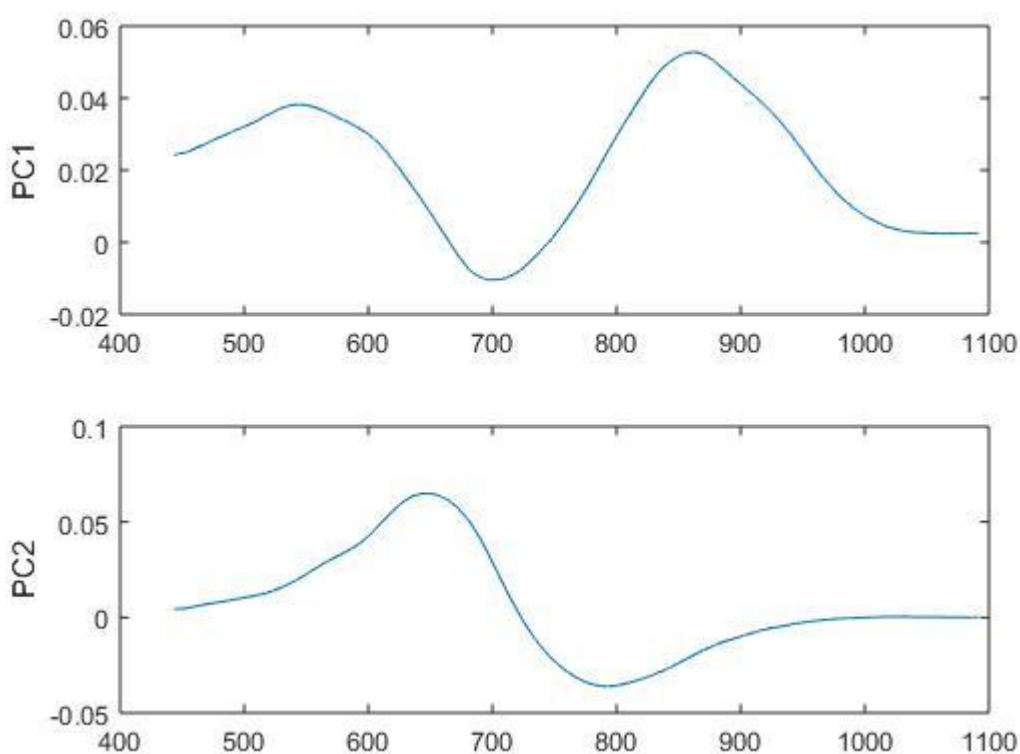
เมื่อพิจารณากราฟ PCA ในภาพที่ 35 ที่ถูกปรับปรุงสเปกตรัมด้วยวิธี Normalization พบว่า พอลิเมอร์มีการกระจายตัวต่างไปจากการปรับปรุงสเปกตรัมด้วยวิธี SNV และจัดกลุ่มให้อยู่ในลักษณะที่พอจะสามารถจัดกลุ่มบได้ และสามารถนำไปแบ่งกลุ่มอย่างง่ายด้วยการใช้คำสั่งจากโปรแกรม Labview ได้ โดยจะสามารถแบ่งออกเป็น 3 คือ กลุ่ม PET/PS กลุ่ม HDPE/PP และกลุ่ม PVC สีขาว

ทั้งหมดจากที่เคยแยกออกมาเป็นกลุ่มผิวเรียบ และผิวขรุขระ แต่ไม่สามารถคัดแยกกลุ่มพอลิเมอร์สีออกจากกันได้



ภาพที่ 35 กราฟ PCA ของสเปกตรัมที่ถูกปรับปรุงด้วย NORM01

เมื่อพิจารณาที่โหนดดิ่งของ PC1 และ PC2 ในภาพที่ 36 พบว่า โหนดดิ่ง PC1 พิจารณาช่วง 440-650 และ 870 นาโนเมตร ส่วนโหนดดิ่ง PC2 พิจารณาที่ 650 และ 790 นาโนเมตร ซึ่งพีคที่ 710 เป็นของโอเวอร์โทนลำดับที่ 4 ของ C-H stretching ของวง benzene พีคที่ 870 นาโนเมตร เป็นของ C-H และ C-C stretching ซึ่งคาดว่าจะจะเป็น 2 พีคหลักในการพิจารณาการแยกกลุ่ม แต่ก็ยังไม่สามารถแยกชนิดของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ และ PVC สีขาวได้ เนื่องจากยังปรากฏพีคที่ 790 นาโนเมตร แม้ว่าจะถูกลดความสำคัญลงไป แต่ก็ยังคงทำให้พอลิเมอร์ดังกล่าวถูกจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกัน



ภาพที่ 36 โหลดติงของกราฟ PCA ของสเปกตรัมที่ถูกปรับปรุงด้วย NORM01

4.3.3 การทำนายชนิดขยะด้วยเครื่อง NIR Line scan Ib

การทดสอบการทำนายตัวอย่างโดยใช้ชุดข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCA ในส่วนที่มีการรวมทุกชิ้นงานตัวอย่างมาวิเคราะห์ร่วมกันมาสร้างเป็นแบบจำลองทำนาย (Prediction model) อยู่ภายในโปรแกรม Labview แล้วทำการทดสอบรวมกับการทำงานของระบบ line scan แบบอัตโนมัติโดยการให้สายพานเคลื่อนตัวแล้วชิ้นงานจะเคลื่อนที่ผ่านบริเวณใต้สลิต ตัวโปรแกรมจะทำการจับภาพและวิเคราะห์ตลอดเวลา เมื่อมีวัตถุเคลื่อนที่ผ่าน และตรวจจับได้ว่ามีวัตถุเข้ามา จะแปลงภาพนั้นเป็นสเปกตรัม แล้วนำเอาสเปกตรัมนั้นไปคู่กับโหลดติงของข้อมูลเพื่อทำการเทียบข้อมูลที่ได้ออกมาที่หน้าจอโดยใช้สีเป็นสัญลักษณ์แทนชนิดพอลิเมอร์ ว่าวัตถุนั้นเป็นพอลิเมอร์ชนิดใด ในขั้นตอนนี้มี การทดสอบ 2 ชั้น คือ การทดสอบการทำนายชิ้นตัวอย่างพอลิเมอร์ที่เตรียมไว้ และการทำนายตัวอย่างที่มาจากขยะจริง ซึ่งผลการทำนายชิ้นงานตัวอย่างจะแม่นยำกว่า เพราะปัจจัยรบกวนน้อยกว่า

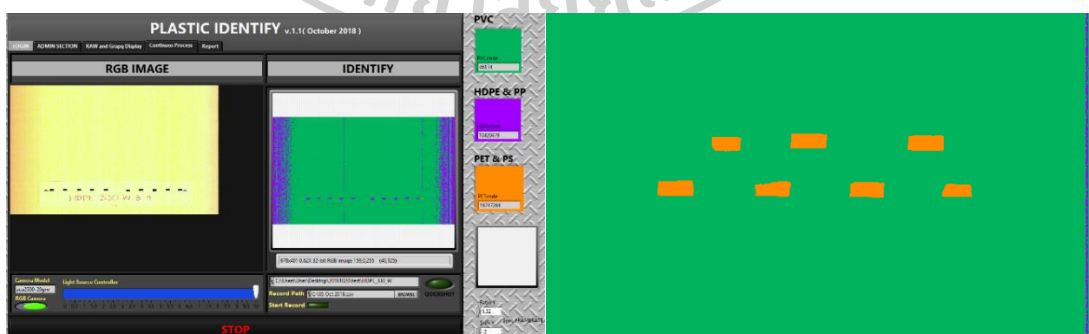
ภาพที่ 37 แสดงหน้าจอของโปรแกรม Labview โดยในหน้าต่างนี้แบ่งเป็น 2 หน้าจอหลักในการแสดงผล คือ จอแสดงภาพจริงๆ ที่กล้องจับได้ และภาพที่ผ่านการประมวลผลจากสมการที่นำค่าโหลดติง และค่า B_0 ของกราฟ PCA ที่ผ่านการปรับปรุงสเปกตรัมด้วยวิธี normalization โดยให้

ทำนายพลาสติกออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่ม PET/PS กลุ่ม HDPE/PP และกลุ่ม PVC โดยในการทดสอบคือ ให้อายุพลา และระบบทั้งหมดเริ่มทำงาน เมื่อวัตถุไหลผ่านบริเวณใต้สลิต ก็จะปรากฏภาพขึ้นมาที่หน้าจอทั้ง 2 ซึ่งจะสามารถบอกได้ว่า พอลิเมอร์ชิ้นนั้นจะถูกทำนายไปอยู่พอลิเมอร์กลุ่มไหน ดังรูปที่ 37 โดยผลการทำนายชนิดพลาสติกตัวอย่างเป็นดังตาราง ที่ 8 โดยผลการทำนายจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ %Separation คือ ค่าที่เอาไว้บอกความสามารถในการคัดแยกชนิด และ %Purification ที่เอาไว้บอกถึงควมบริสุทธิ์ของสิ่งที่คัดแยกได้ โดยการทดสอบแบบจำลองทำนายด้วยตัวอย่างพอลิเมอร์นี้จะได้ %Separation และ %Purification ที่ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะ PVC ที่สามารถคัดแยกออกจากพอลิเมอร์ชนิดอื่นได้ %Purification 100% ส่วนชนิดอื่นๆ จะได้ประมาณ 60% มี PS ที่จะได้ค่อนข้างต่ำเนื่องจากการกระจายตัวของกลุ่ม PS ในกราฟ PCA (ภาพที่ 35) กระจายตัวไปปะปนกับทั้งกลุ่ม HDPE/PP และกลุ่มที่พอลิเมอร์หลากหลายอยู่ปะปนกัน



ตารางที่ 8 ผลการทดลองแบบจำลองทำนายด้วยพลาสติกตัวอย่าง

Polymer	Color	Amount	Total	Corrected	Total corrected	%Separation	%Purification
PET	Red	5	18	3	11	15.217391	61.11
PET	Green	6		1			
PET	Blue	7		7			
HDPE	Red	10	30	0	20	28.985507	66.67
HDPE	Green	10		10			
HDPE	Blue	10		10			
PP	Red	10	30	0	20	28.985507	66.67
PP	Green	10		10			
PP	Blue	10		10			
PS	Red	10	30	0	10	15.217391	33.33
PS	Green	10		0			
PS	Blue	10		10			
PVC	Red	10	30	10	30	21.73913	100.00
PVC	Green	10		10			
PVC	Blue	10		10			
SUM			138				



ภาพที่ 37 หน้าจอของโปรแกรม Labview

จากนั้น ทำการทดสอบกับขยะพลาสติกจริง มีทั้งขยะที่รูปร่างสมบูรณ์ และขยะที่เสียรูปร่างไปบ้าง เพื่อให้มีความใกล้เคียงกับขยะจริงๆ โดยทำความสะอาดชิ้นตัวอย่างก่อนที่จะนำมาทดสอบ แล้วทำการทดสอบโดยนำตัวอย่างไปวางบนสายพานลำเลียง แล้วปล่อยให้เคลื่อนผ่านบริเวณ

ตรวจสอบไปเรื่อยๆ ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 38 ซึ่งสามารถทำนายได้บางสี เช่น พลาสติกที่มีสีเขียว หรือ ชิ้นงานที่มีความลักษณะค่อนข้างทึบแสง ส่วนชิ้นงานที่มีสีสดใส หรือ สีแดงจะถูกสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงรบกวนได้ง่าย ส่วนความผิดพลาดจะเกิดขึ้นกับพลาสติกที่เป็นสีขาวมากที่สุด เพราะตัวโปรแกรมจะจัดให้ไปอยู่กลุ่มเดียวกับตัวสายพานลำเลียงซึ่งเป็น PVC โดยผลการทดลองครั้งนี้สามารถสรุปเป็น %ความถูกต้องได้ ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบกับขยะพลาสติก

Plastic waste	Input	Type	Input Type	Predicted	%separation	%Purification
Tea bottle	11	PET	23	5	6.50	21.74
Soft drink bottle	12					
Bottle cap	60	HDPE&PP	89	35	11.30	39.33
Lubricant oil bottle	6					
Shampoo bottle	7					
Bathroom cleaning bottle	5					
Powder bottle	2					
Detergent bottle	2					
Dishwashing bottle	1					
PP board	6					
Plastic spoon	204	PS	204	0	0.56	0.00
PVC Pipe	1	PVC	38	22	73.73	57.89
Bottle label	37					



ภาพที่ 38 ภาพที่ได้จากการนำขยะพลาสติกจริงไปวางไว้บนสายพานลำเลียง

ซึ่งที่ผลการทดลองนี้มีค่า %Separation และ %Purification ต่ำ อาจเนื่องมาจากการทำแบบจำลองทำนายใช้ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นแผ่น แต่เมื่อนำมาทดสอบกับขยะพลาสติกของจริง พบว่า ตัวอย่างเหล่านั้นมีปัจจัยรบกวนที่ทำให้เกิดลักษณะภายนอก สีขุ่นงาน และความใสที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ไม่สามารถทำนายชนิดของพลาสติกเหล่านั้นได้อย่างแม่นยำ



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. สามารถสร้างเครื่องสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้บนสายพานลำเลียงกว้าง 80 เซนติเมตร ได้ด้วยเทคนิคเกรตติงแบบส่องผ่าน โดยมีความละเอียดภาพอยู่ที่ 0.45 นาโนเมตร
2. ได้แบบจำลองทำนายสำหรับเครื่อง NIR line scan ที่สามารถคัดแยกพอลิเมอร์ตัวอย่างได้ เป็น 3 กลุ่ม โดยมี %Purification 60% สำหรับกลุ่ม PET/PS 66.67% สำหรับกลุ่ม HDPE/PP และ 100% สำหรับกลุ่ม PVC
3. เมื่อนำแบบจำลองทำนายที่ได้ไปทำนายชนิดของขยะพลาสติกพบว่า ได้ค่า %Purification ลดลงเป็น 21.74% สำหรับกลุ่ม PET/PS 39.32% สำหรับกลุ่ม HDPE/PP และ 57.89% สำหรับกลุ่ม PVC

5.2 ข้อเสนอแนะ

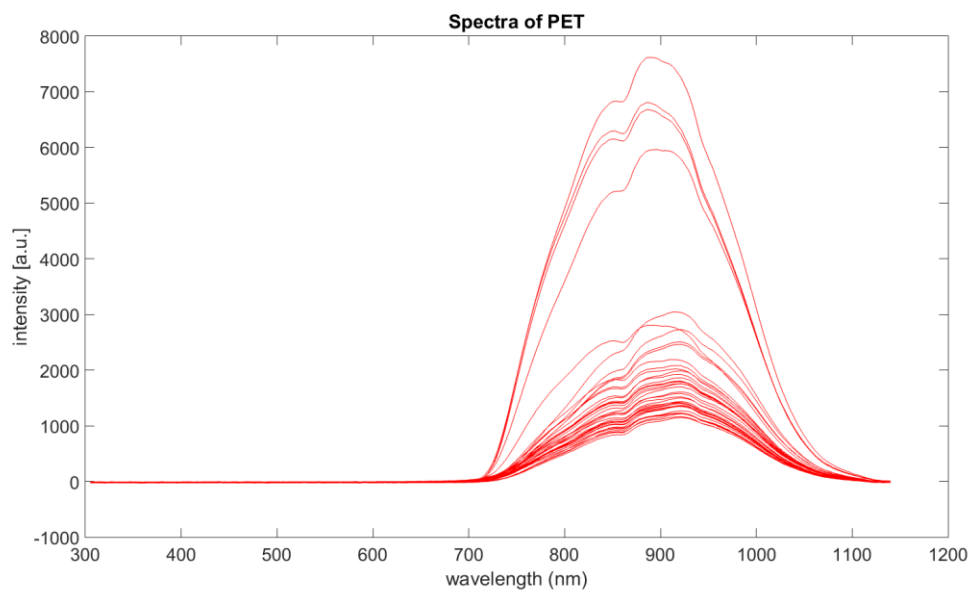
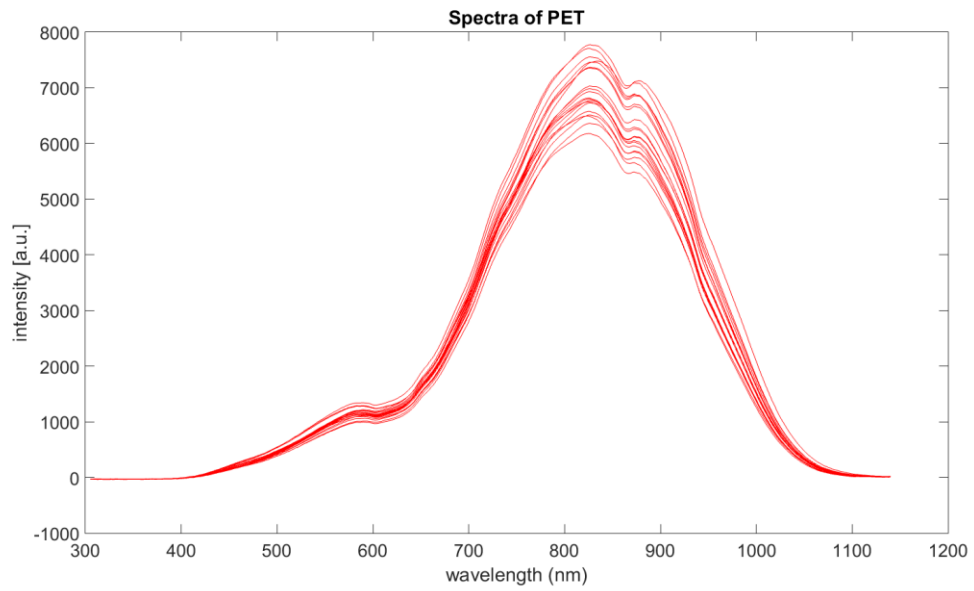
1. ในงานวิจัยนี้ใช้หลอดฮาโลเจนที่มีความสว่างแสง 2700K ซึ่งได้แสงเป็นสีส้ม ซึ่งส่งผลต่อสีของภาพที่ได้และส่งผลกระทบต่อสเปกตรัม จึงควรเปลี่ยนเป็นหลอดที่ค่าความสว่างแสงประมาณ 6000K เพื่อให้แสงของแหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงขาว
2. แบบจำลองทำนายไม่สามารถนำไปใช้กับเครื่องอื่นได้ หากมีการสร้างเครื่องใหม่จะต้องทำการเก็บข้อมูลจากเครื่องนั้นๆ เพื่อทำแบบจำลองทำนายสำหรับเครื่องนั้น
3. ในงานวิจัยนี้ใช้สายพานลำเลียงเป็นสีขาว ซึ่งส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมที่ได้ เพื่อลดการรบกวนจากแสงสะท้อนจากสิ่งที่ไม่ใช่ตัวอย่างที่ต้องการ ควรใช้สายพานลำเลียงเป็นวัสดุที่ไม่มีการสะท้อนแสง หรือมีสีดำไม่มันเงา
4. ในงานวิจัยนี้ทำการ Calibration ตอนติดตั้งเครื่องเพียงครั้งเดียว จึงค่อนข้างได้รับผลกระทบจากสถานะแสงภายนอกที่เปลี่ยนแปลงไปทุกวัน ควรปรับปรุงเครื่องให้สามารถทำการ Calibration ได้อย่างน้อยสัปดาห์ละครั้ง

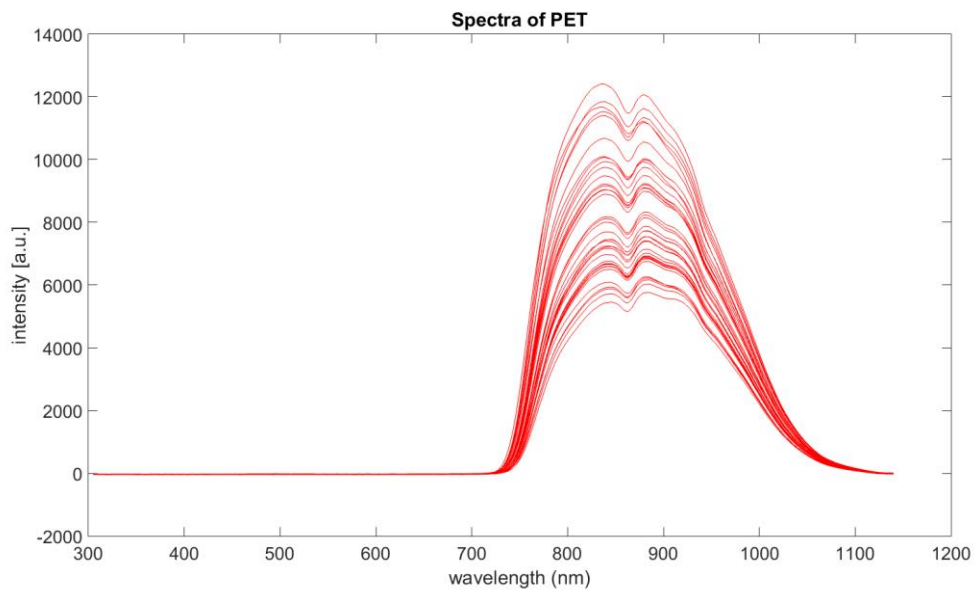
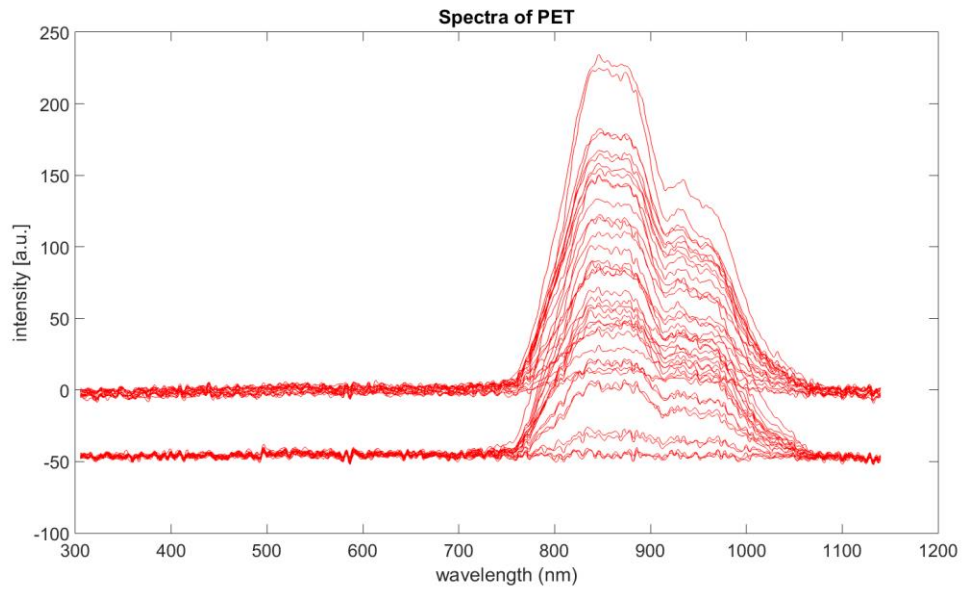


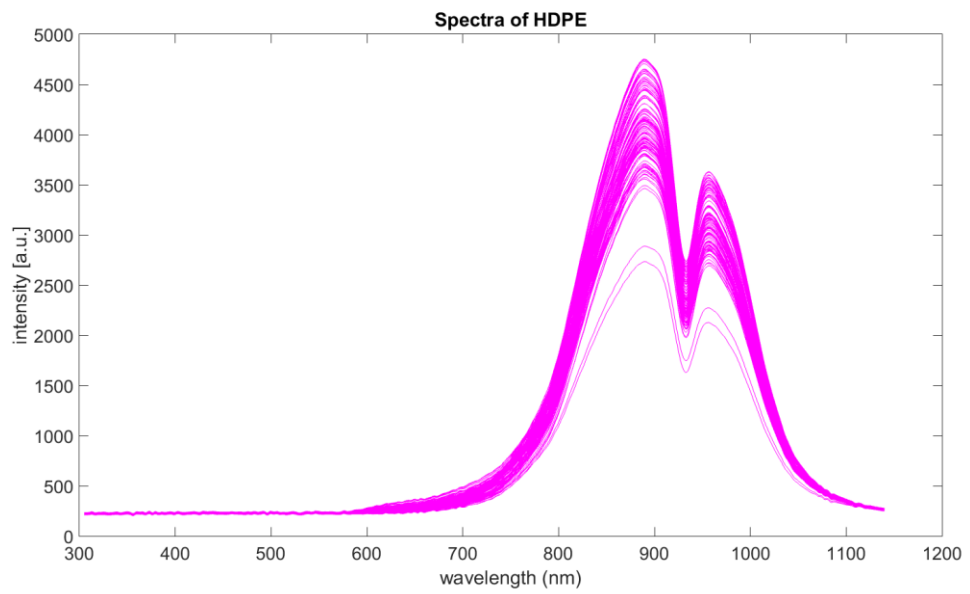
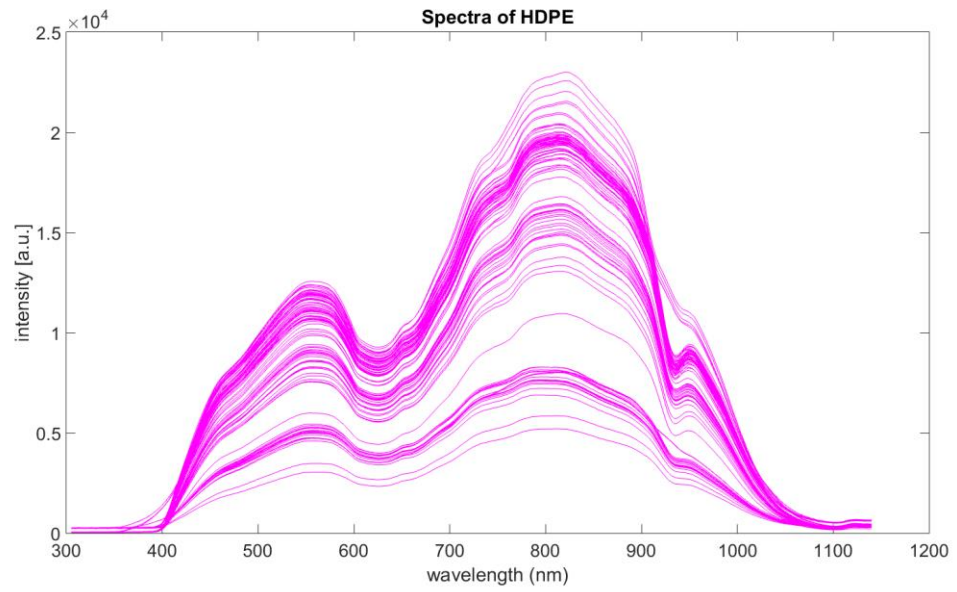
ภาคผนวก

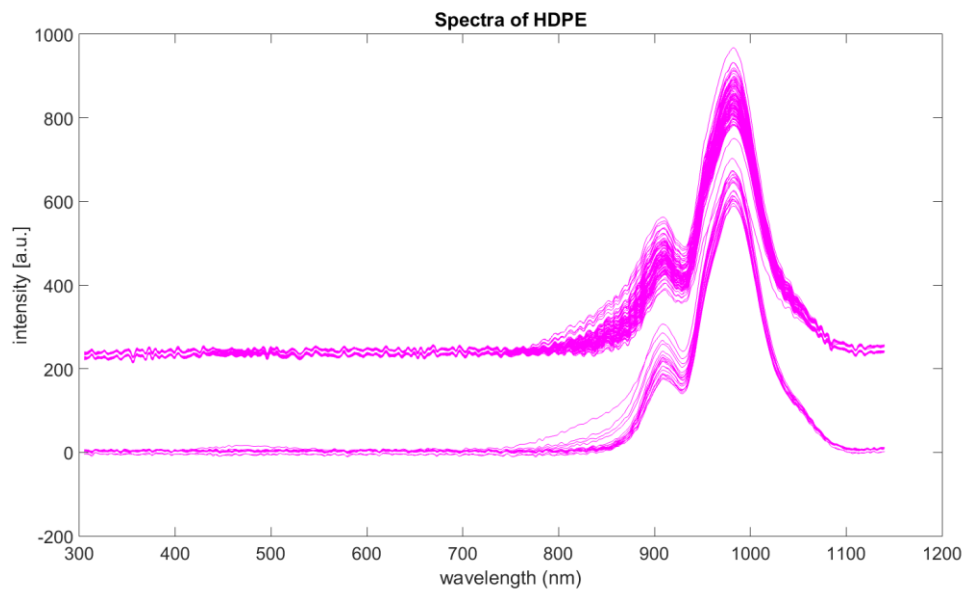
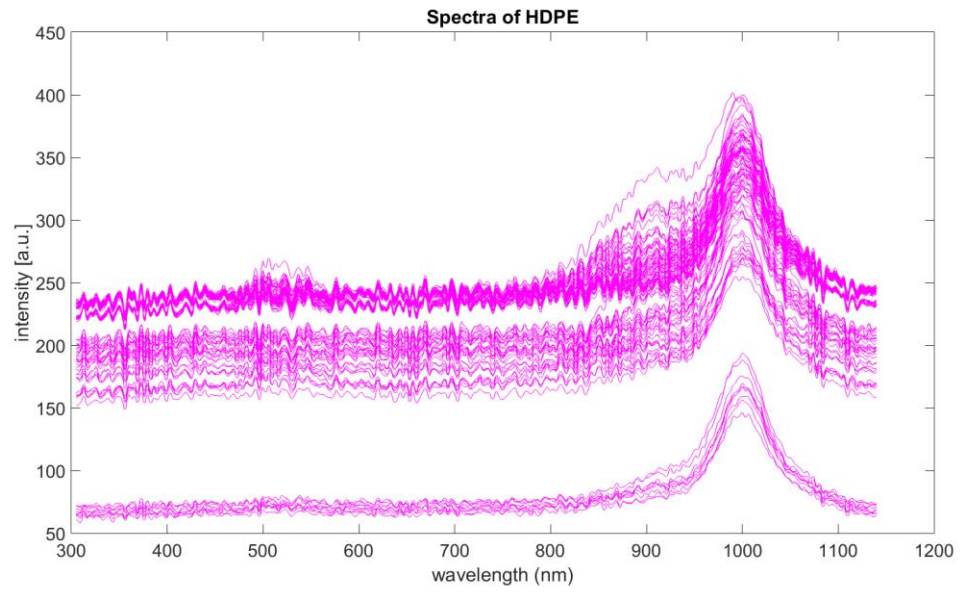


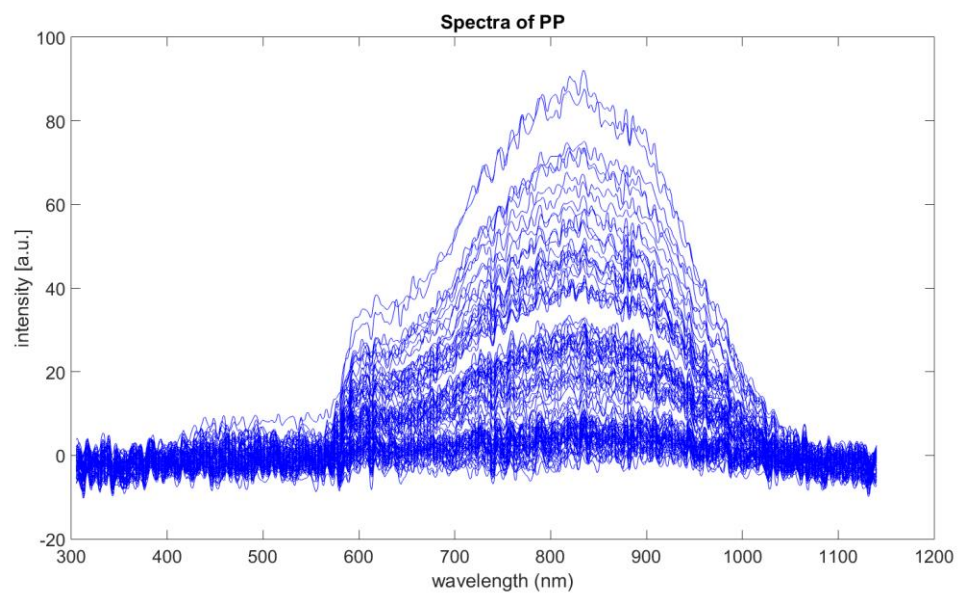
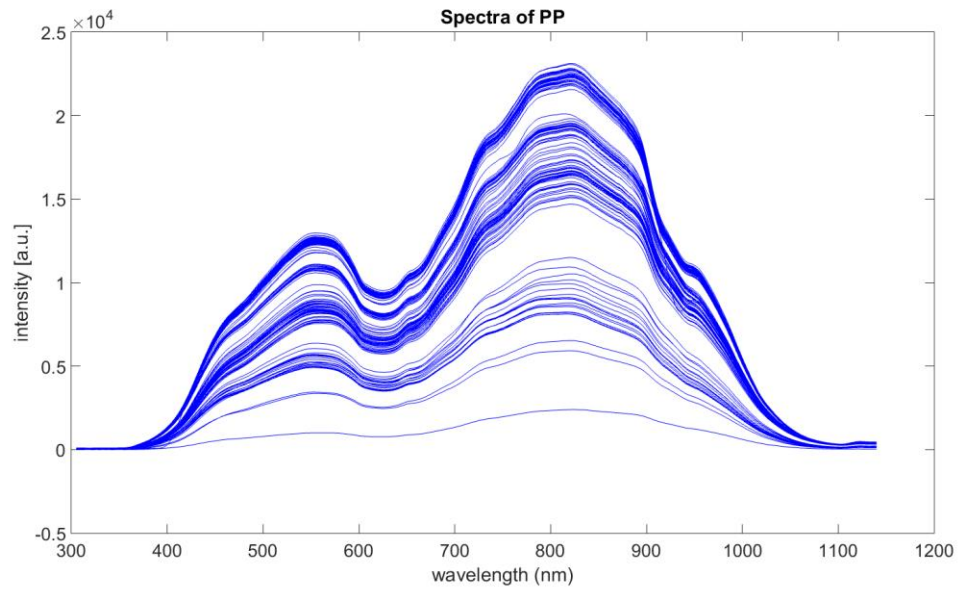
ภาคผนวก ก.1 สเปกตรัมของพอลิเมอร์แต่ละชนิดของเครื่อง Multispectrometer

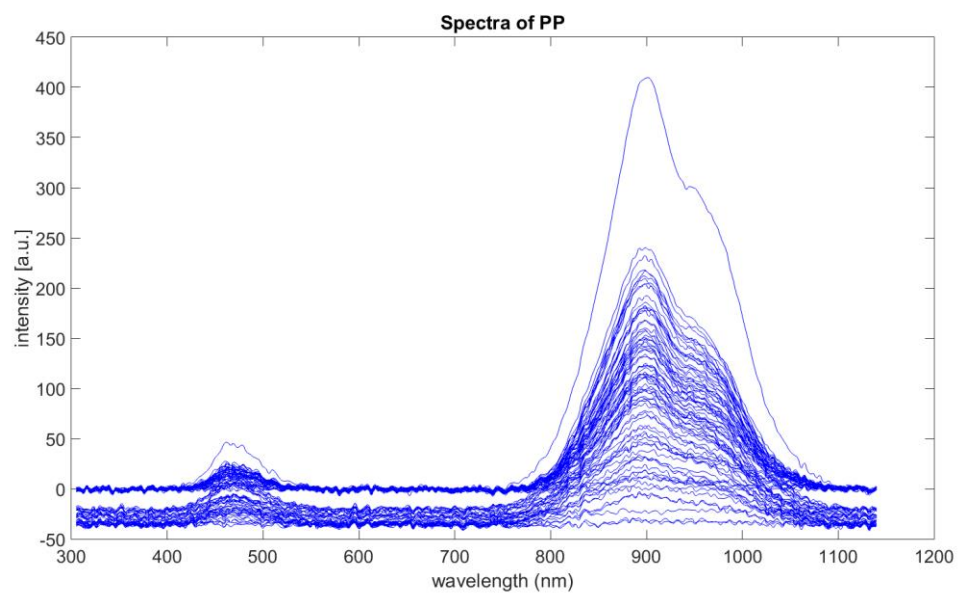
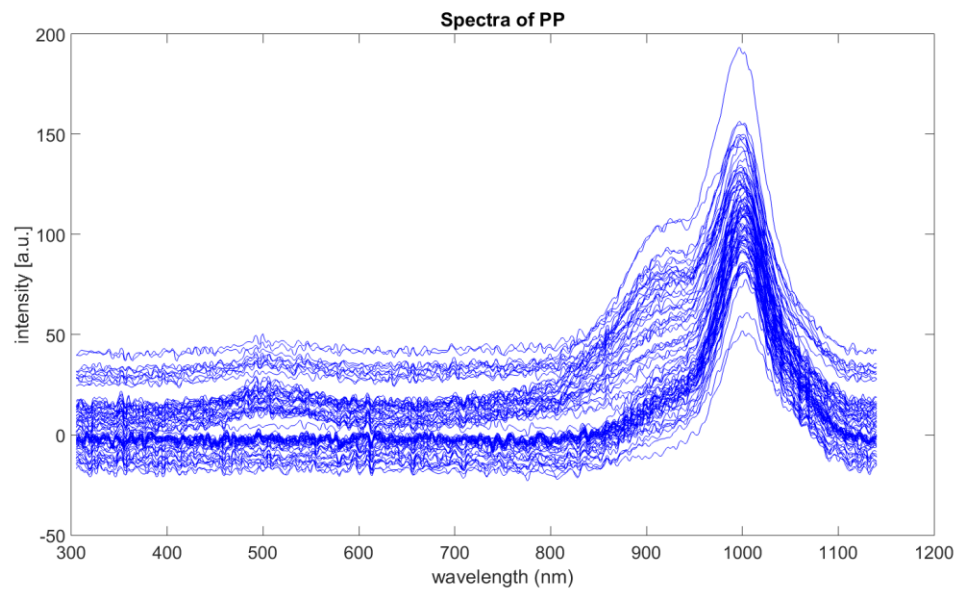


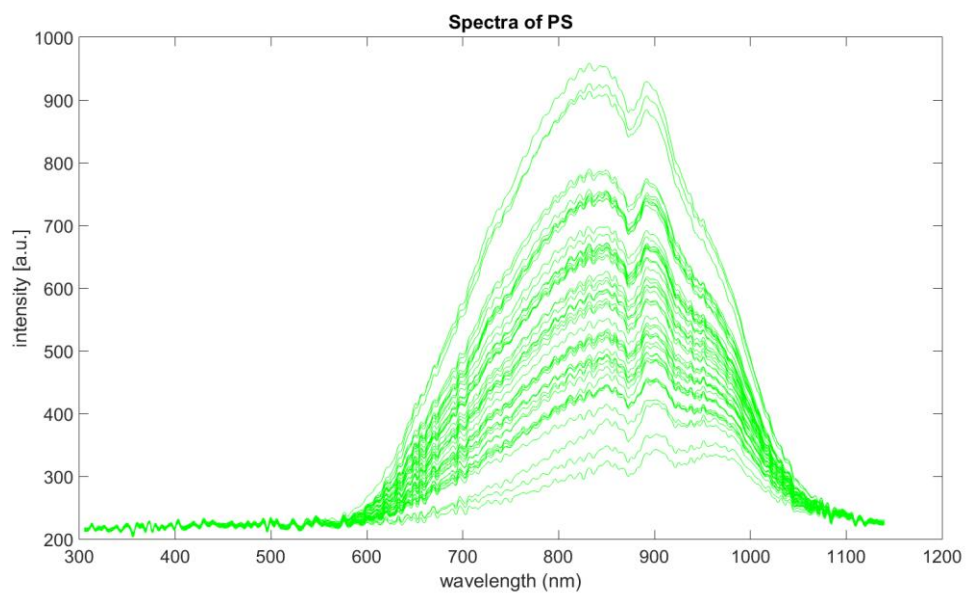
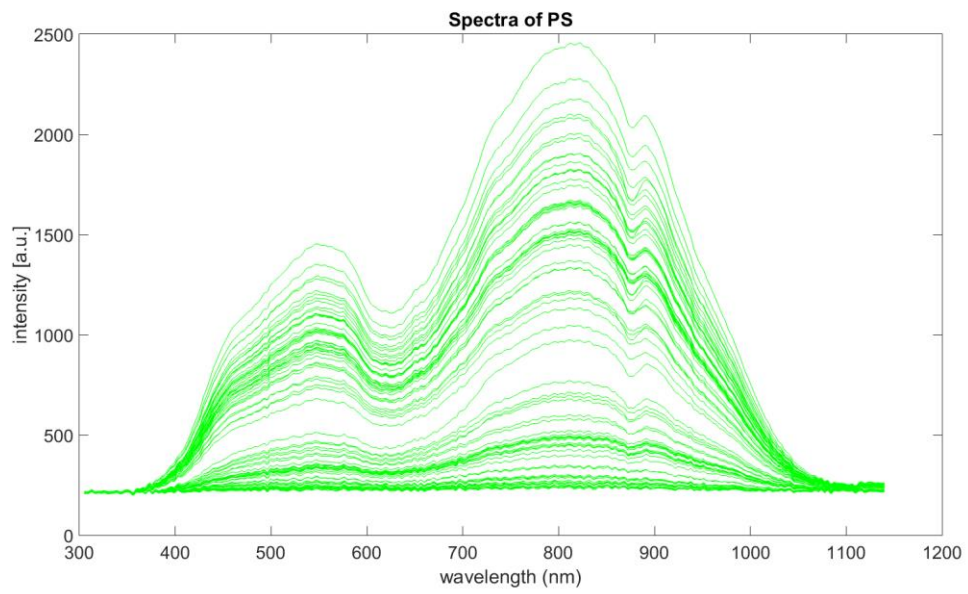


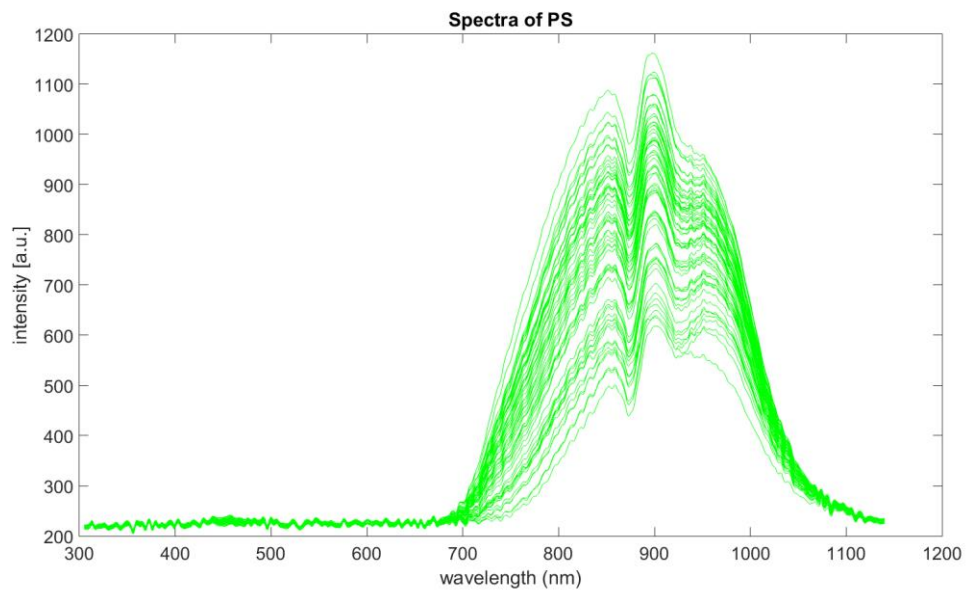
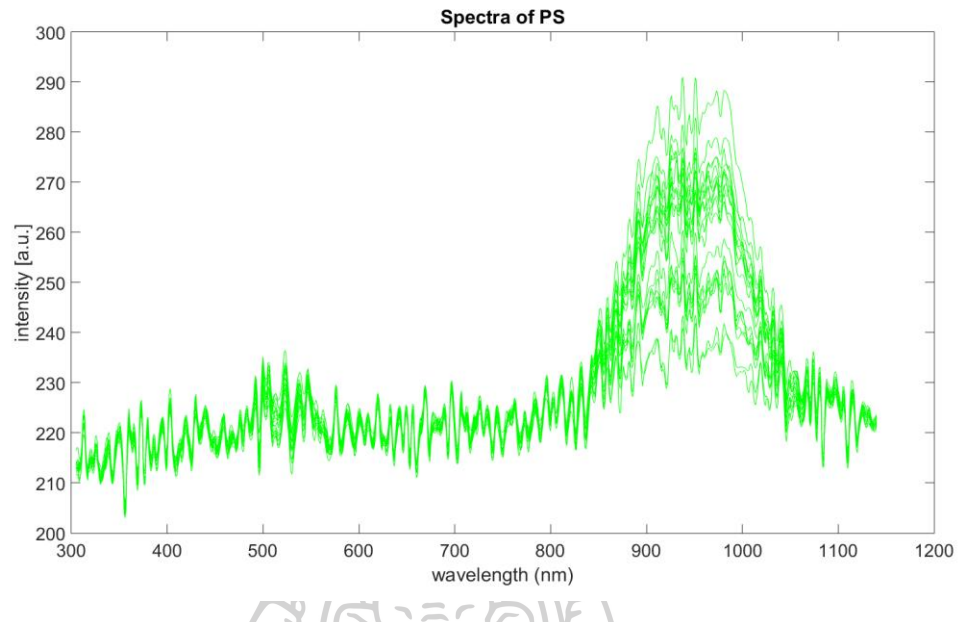


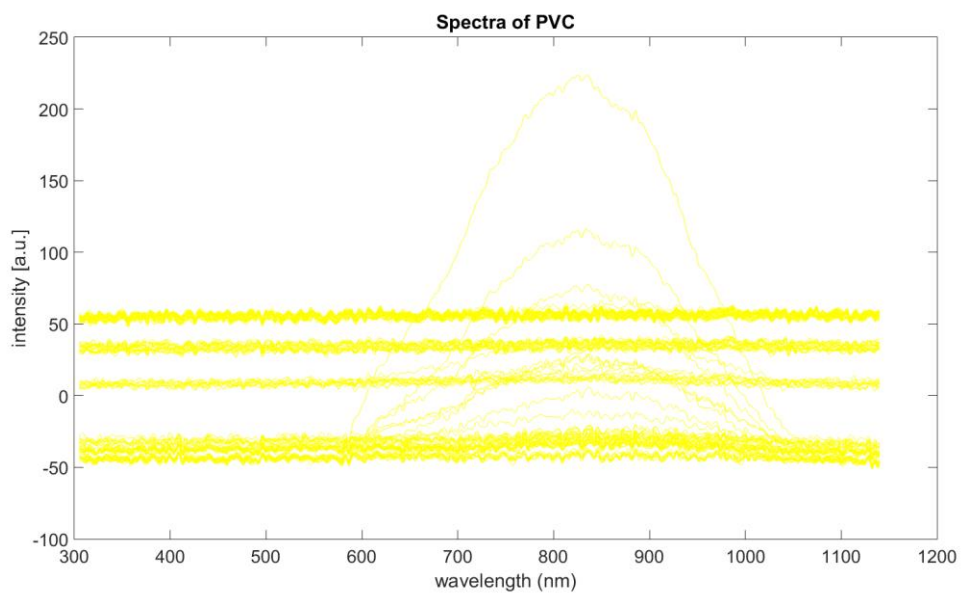
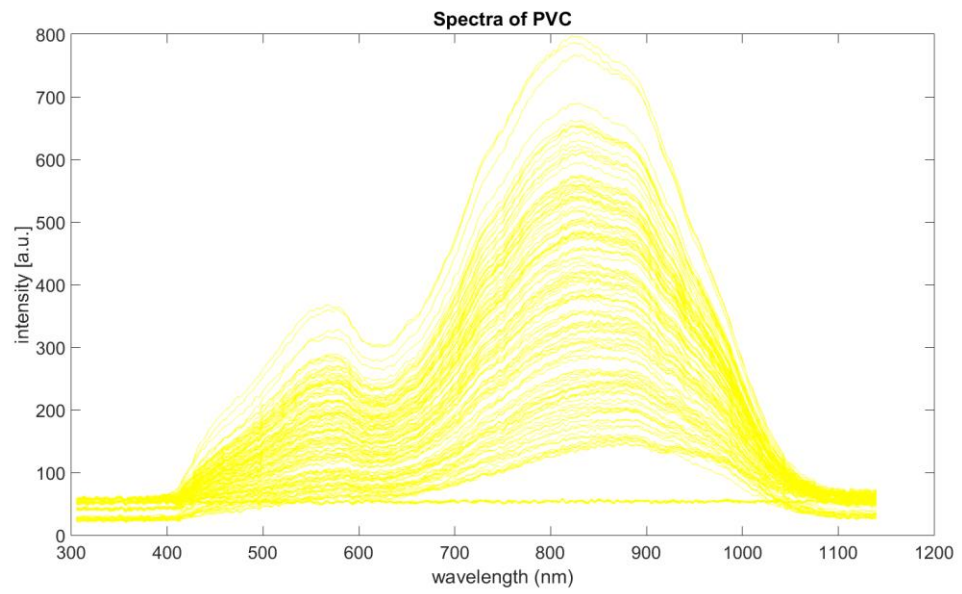


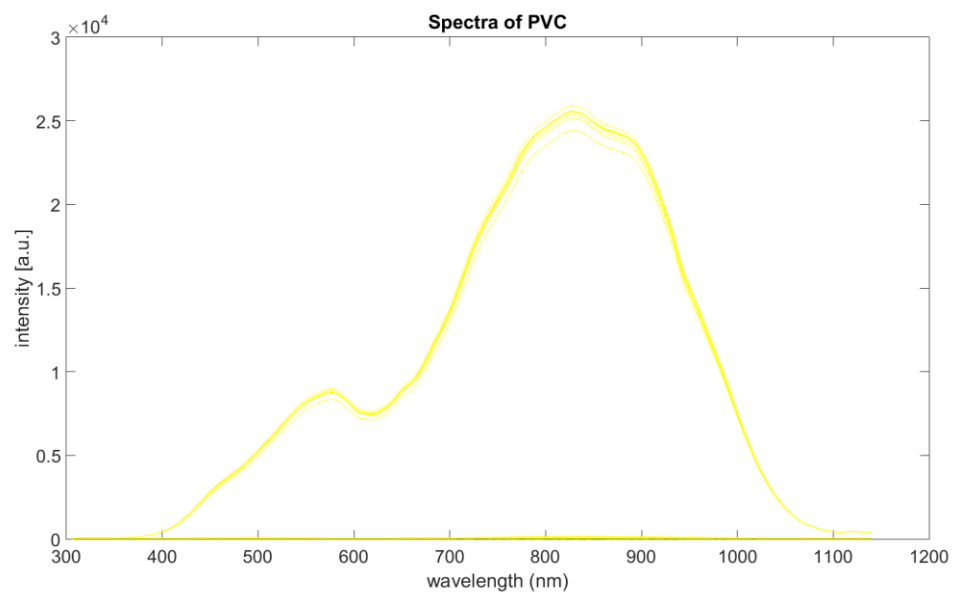
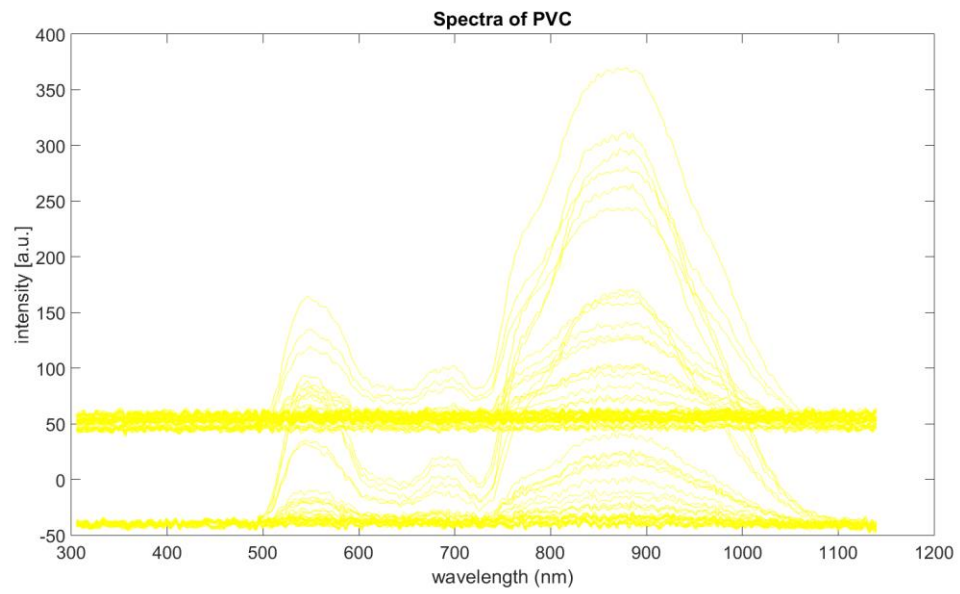




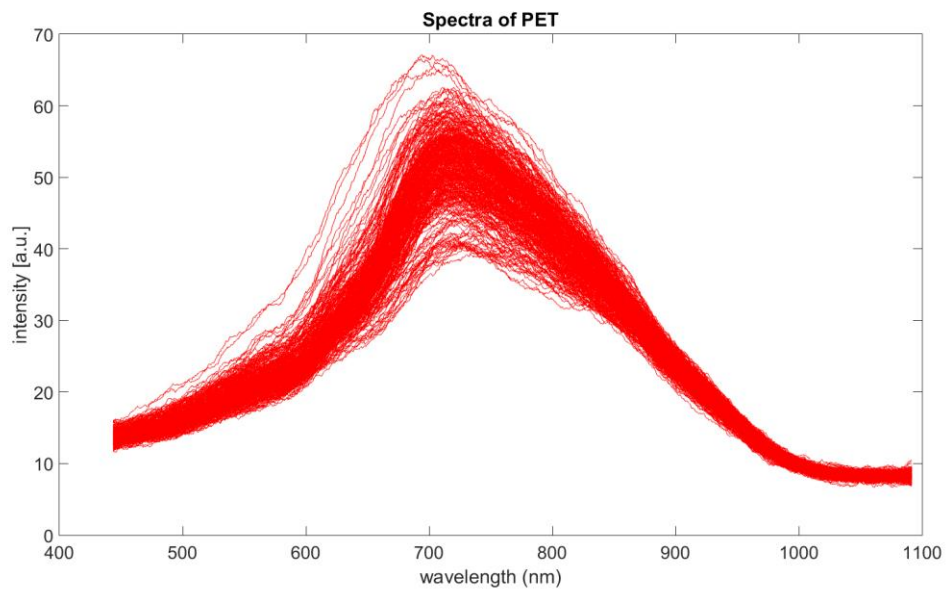
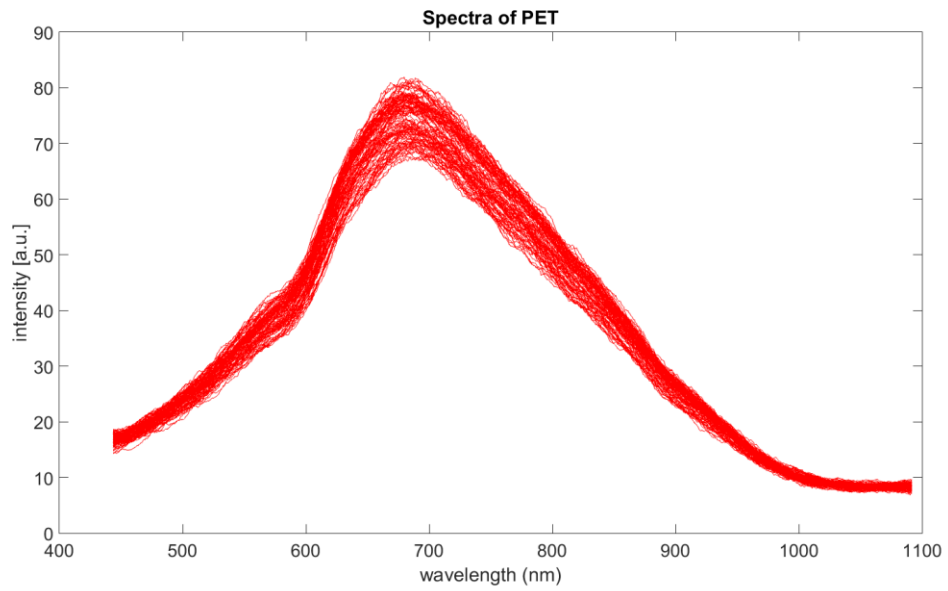


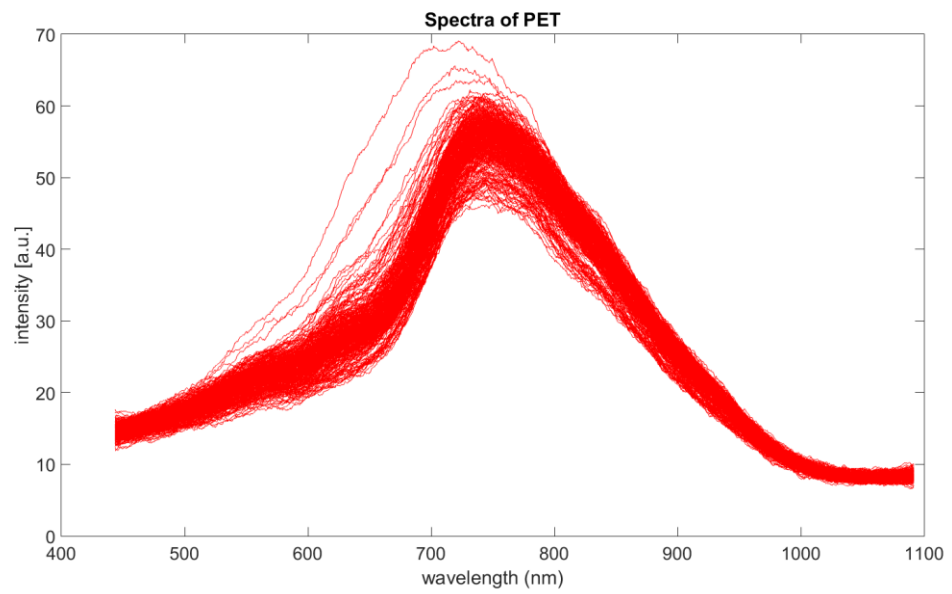
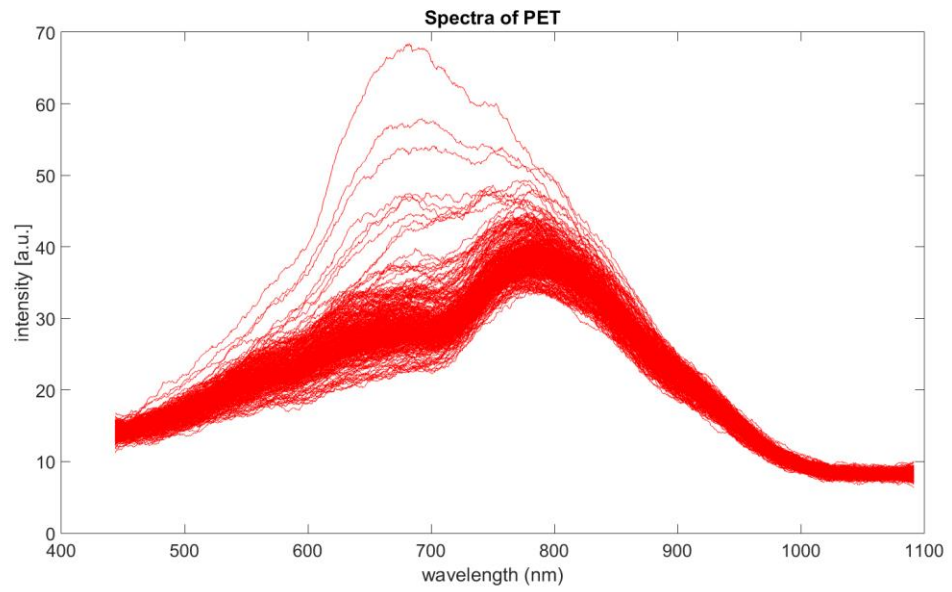


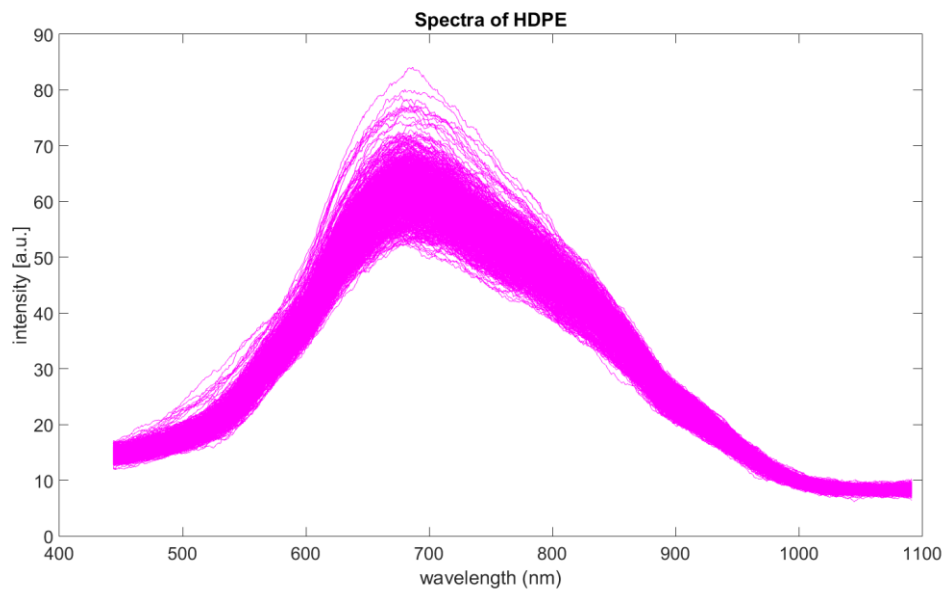
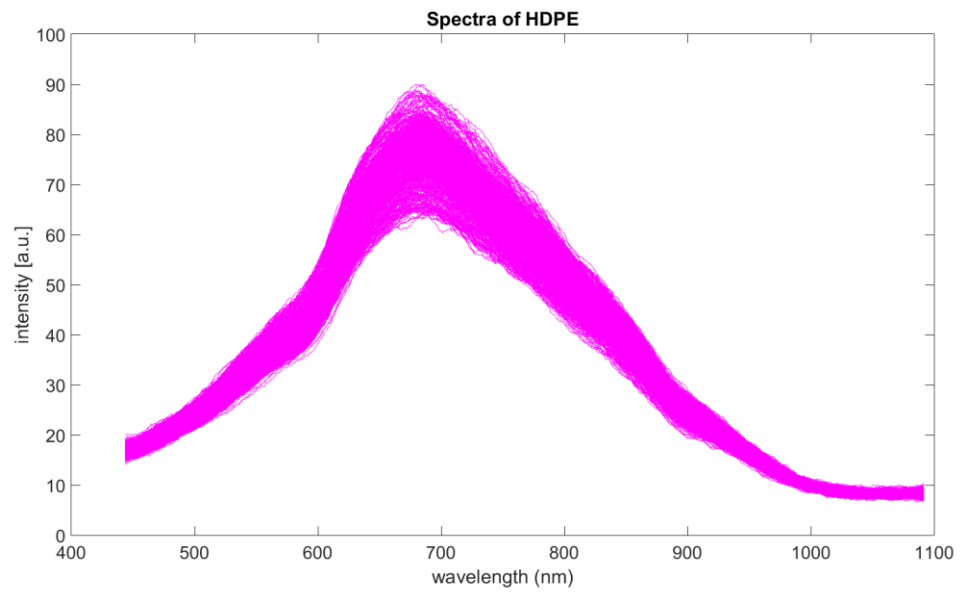


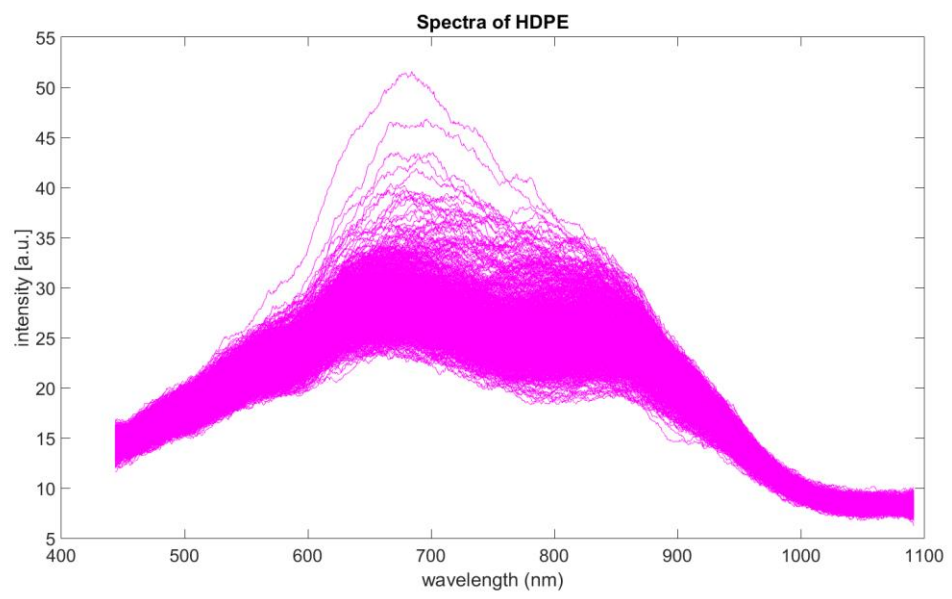
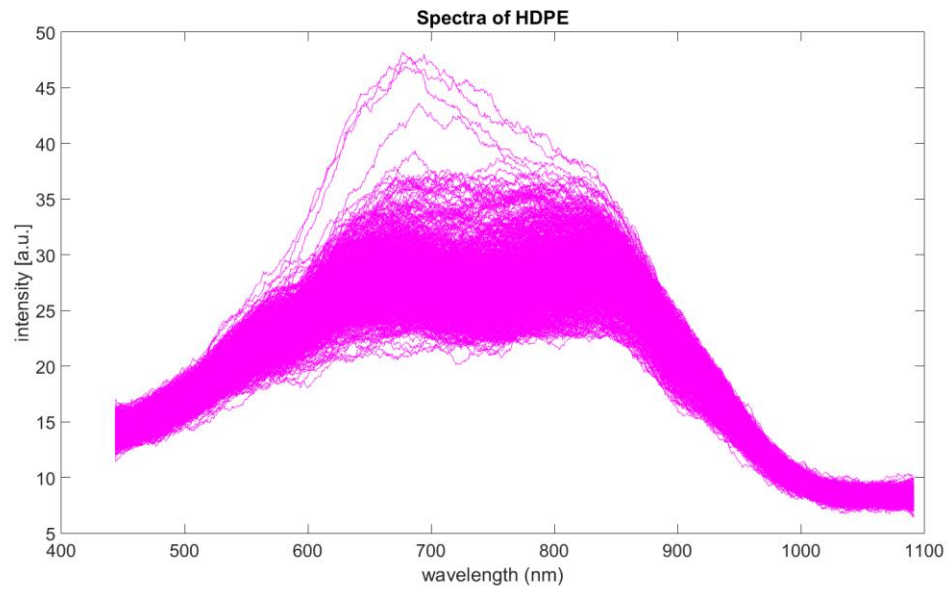


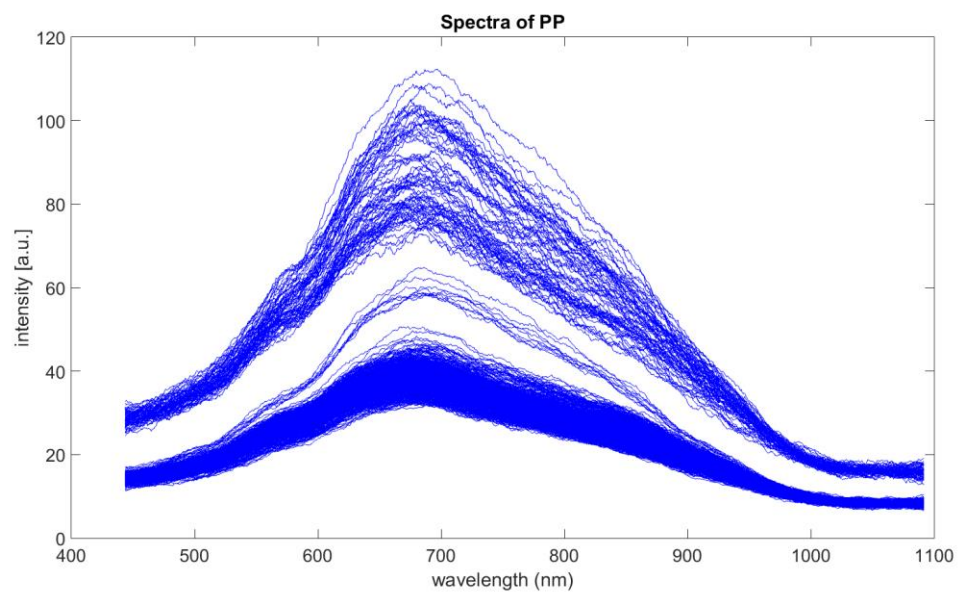
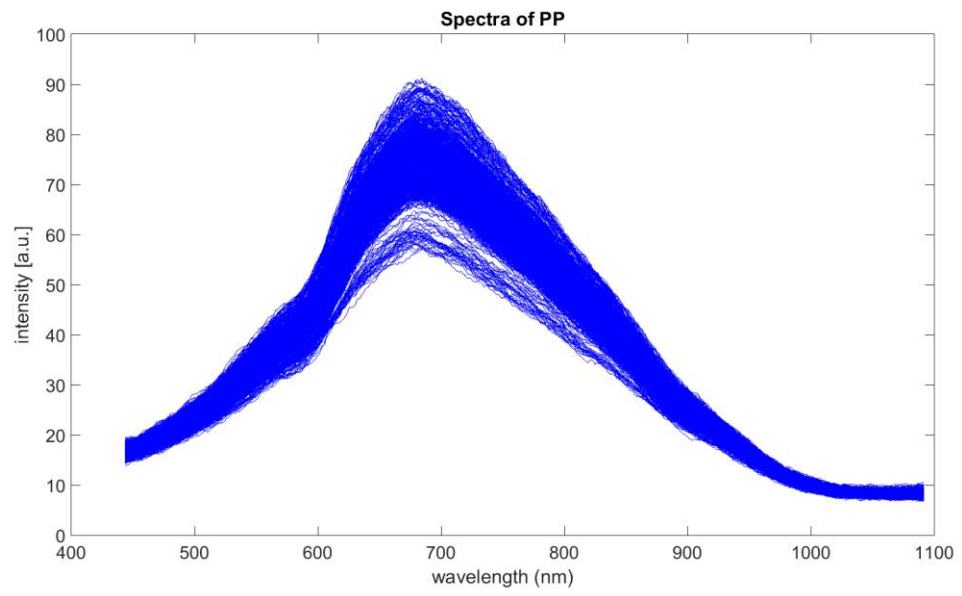
ภาคผนวก ก.2 สเปกตรัมของพอลิเมอร์แต่ละชนิดของเครื่อง NIR line scan Ib

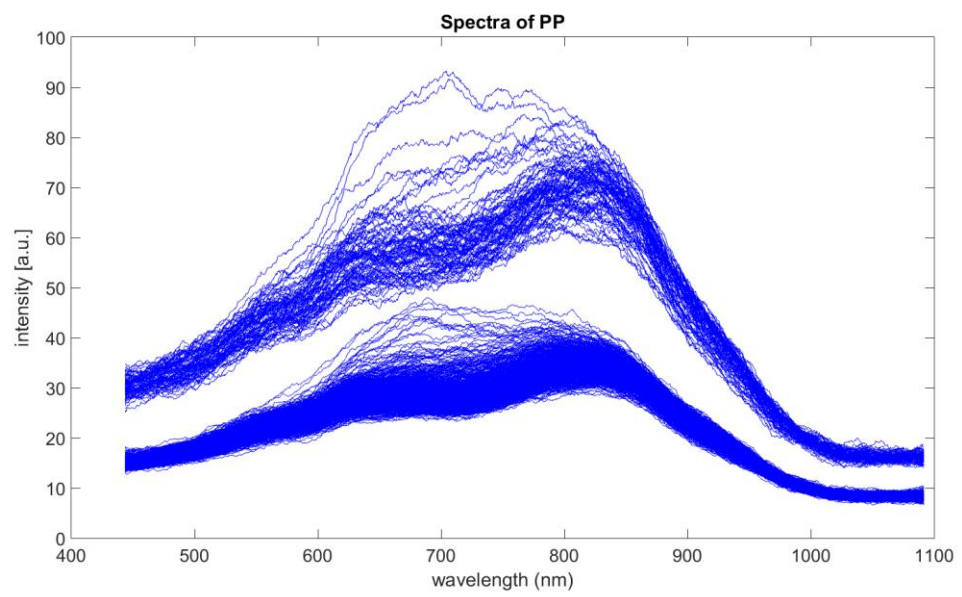
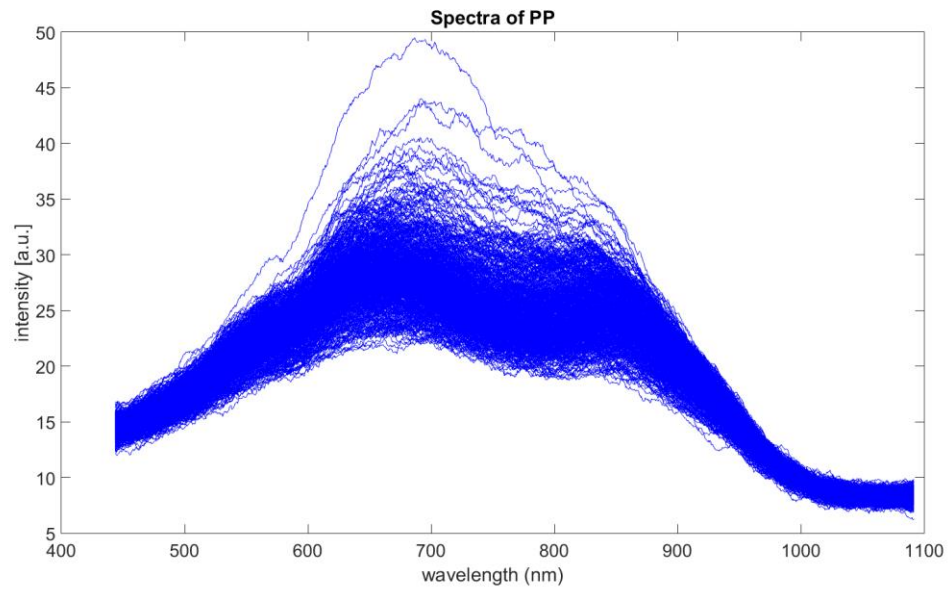


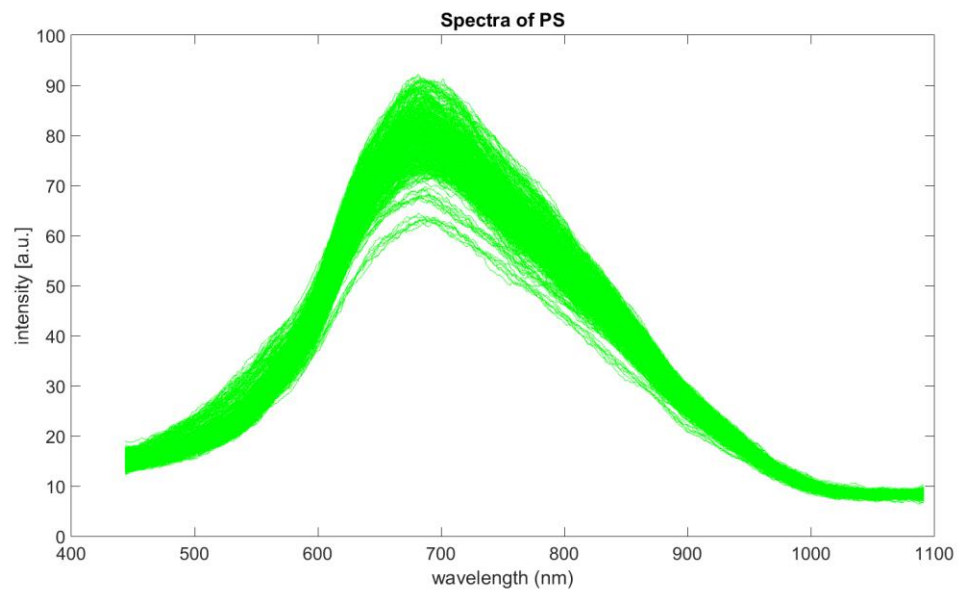
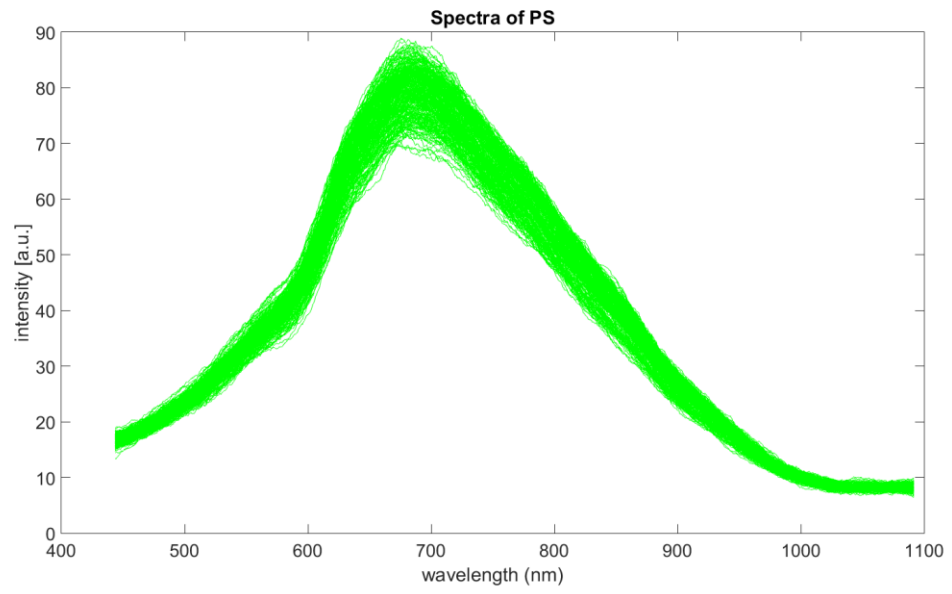


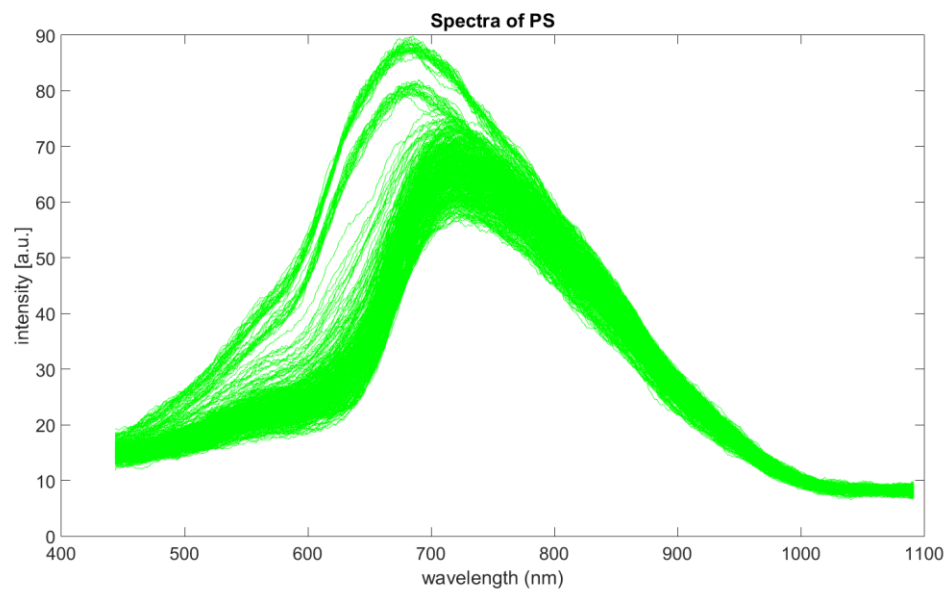
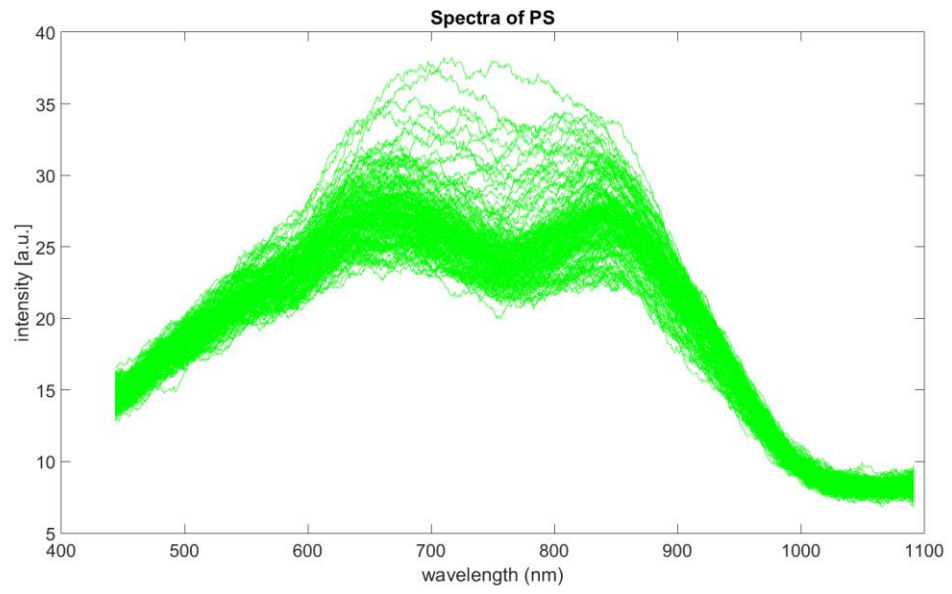


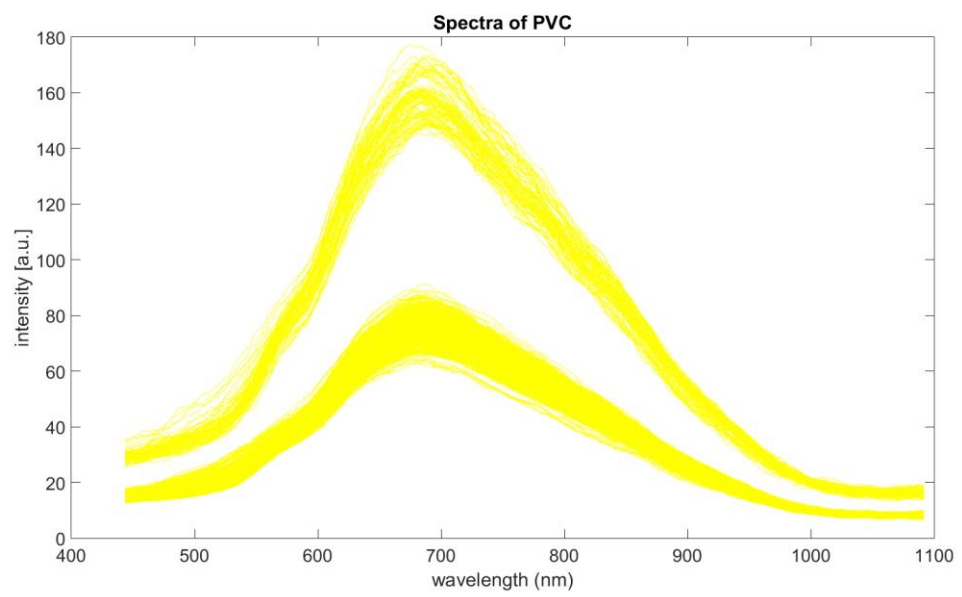
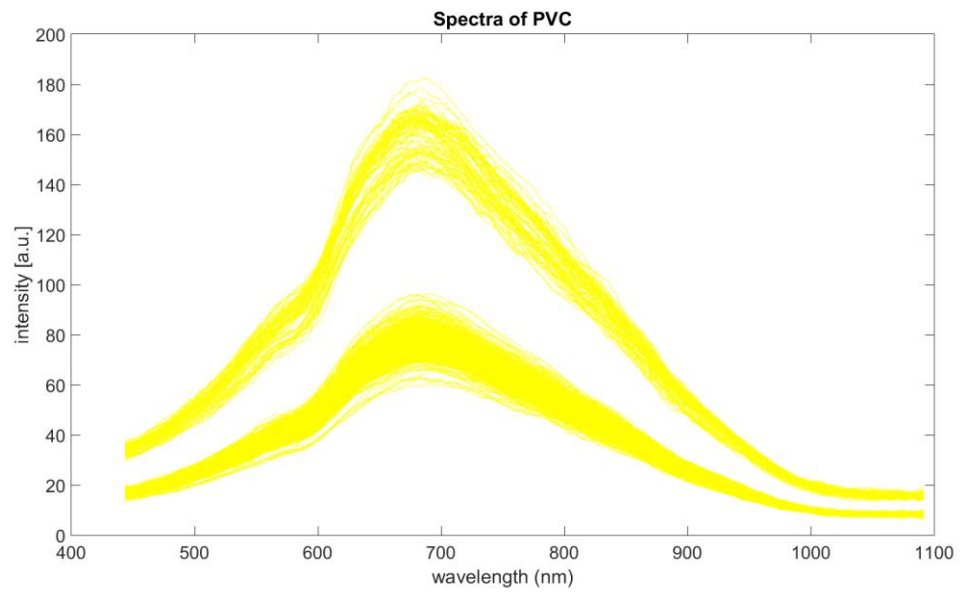


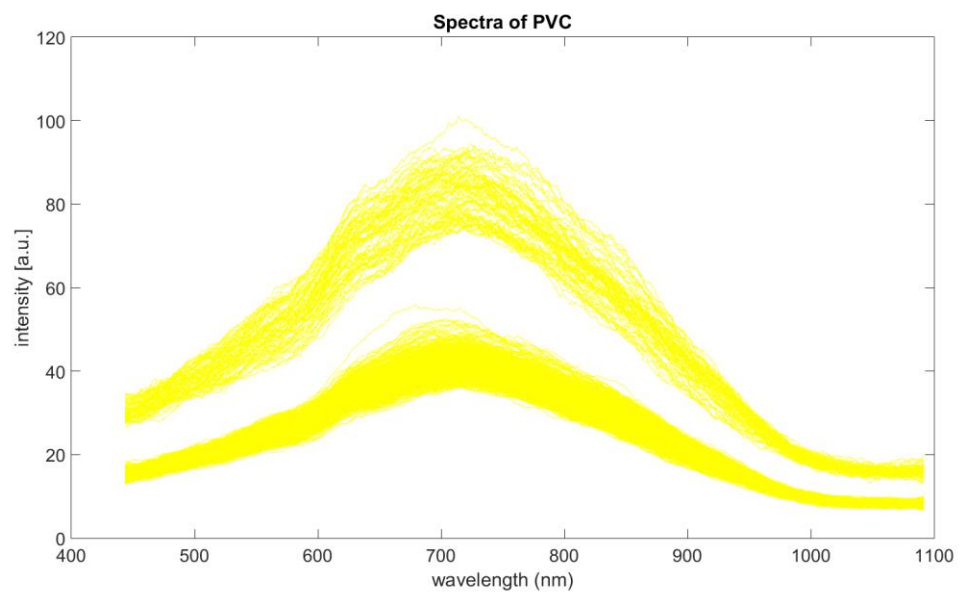
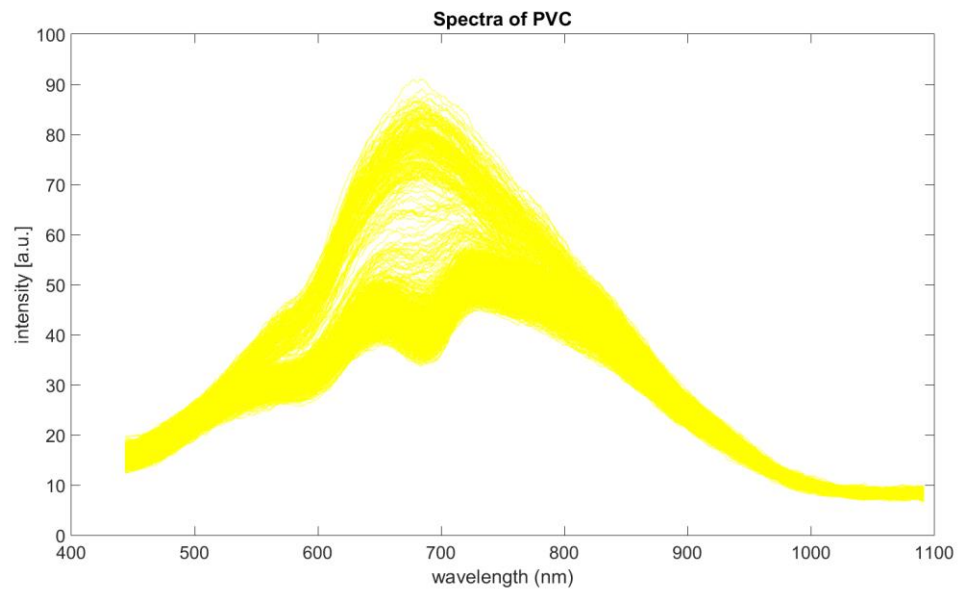




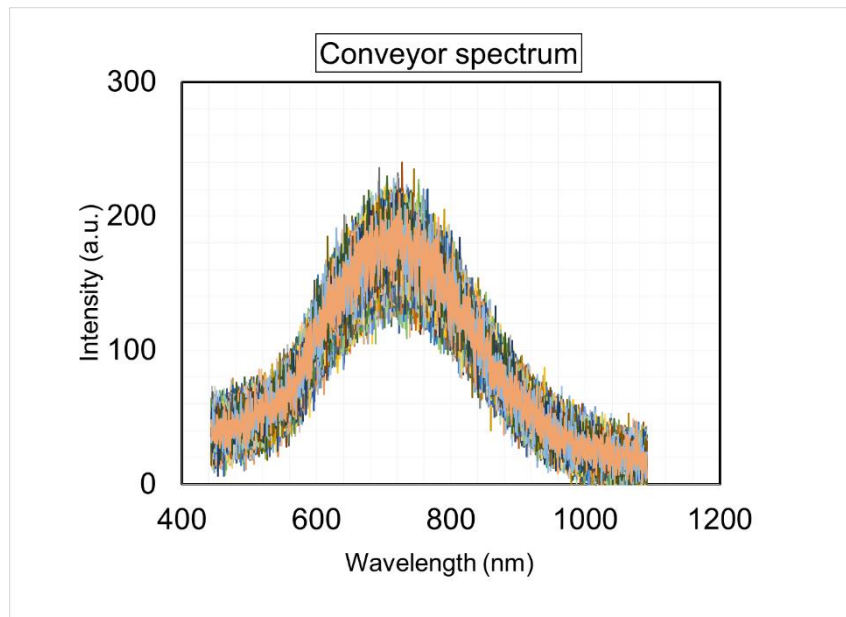






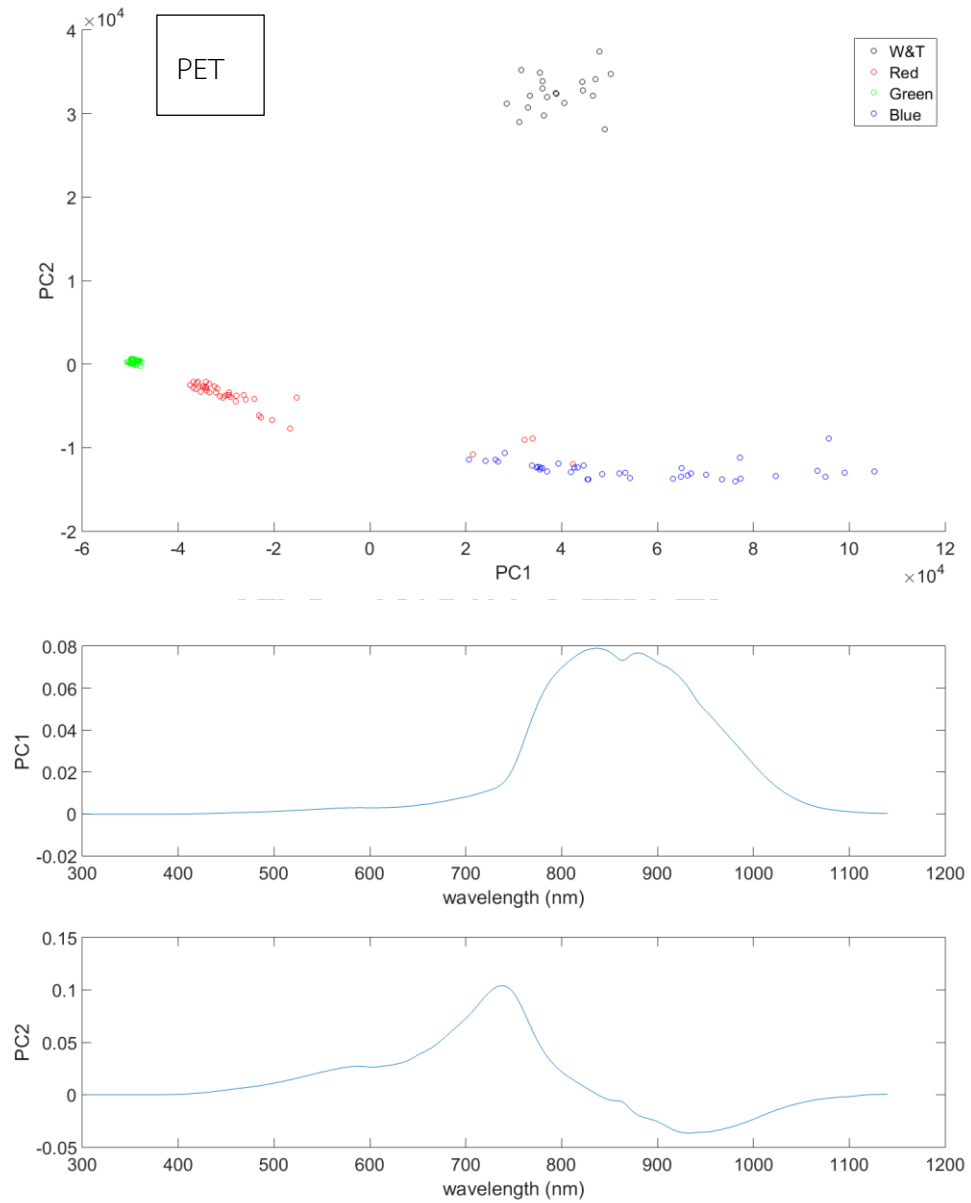


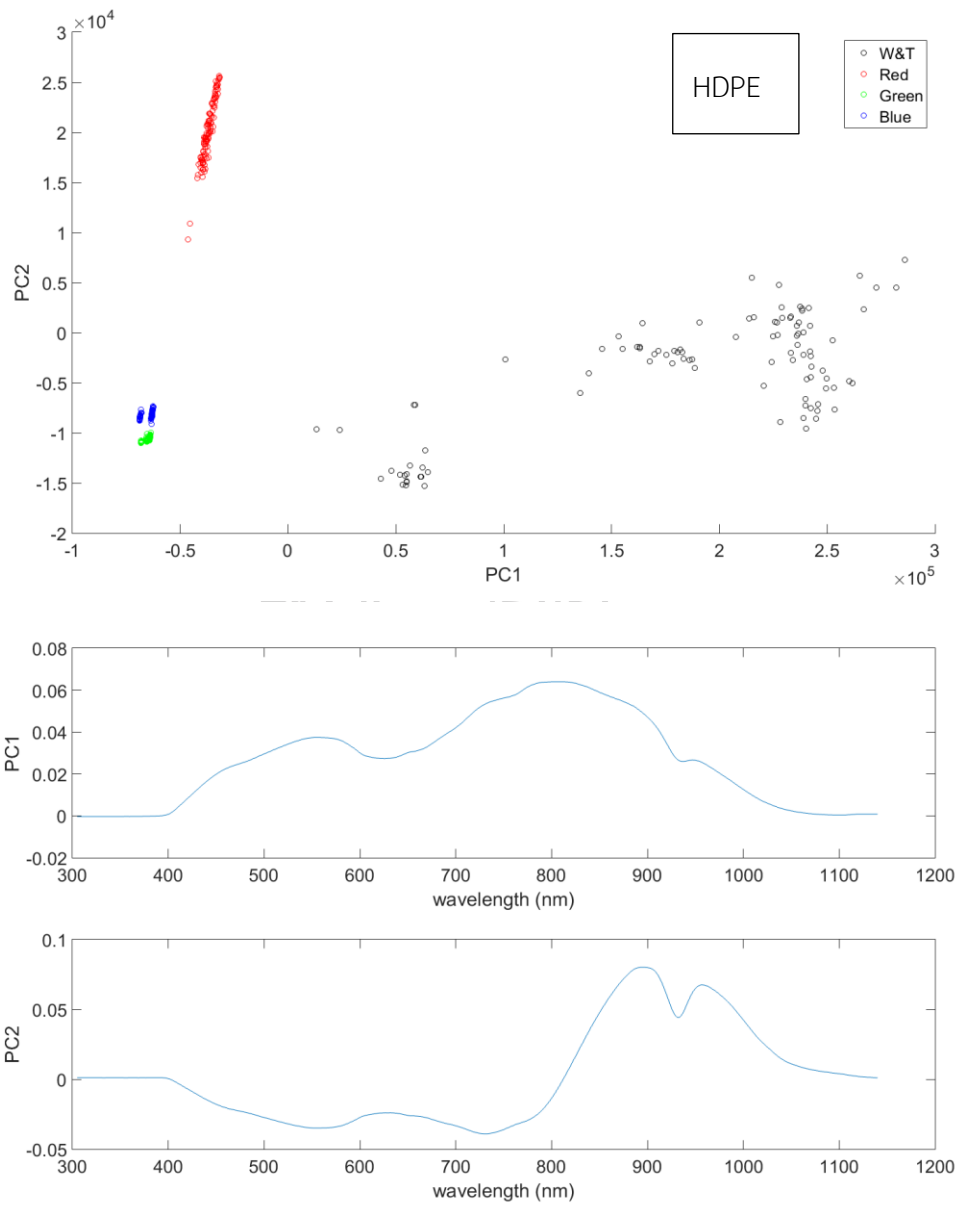
ภาคผนวก ก.3 สเปกตรัมของสายพายลำเลียง

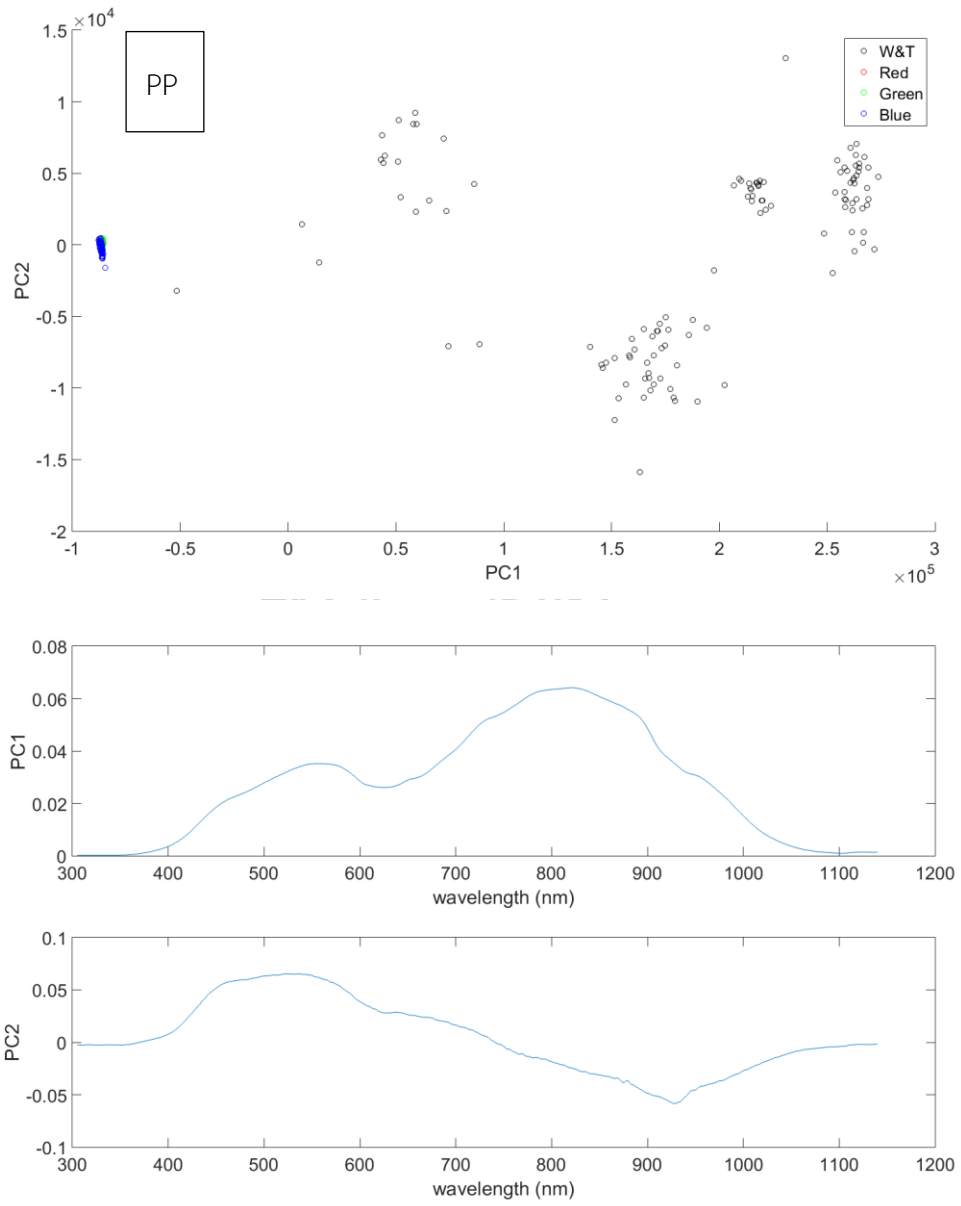


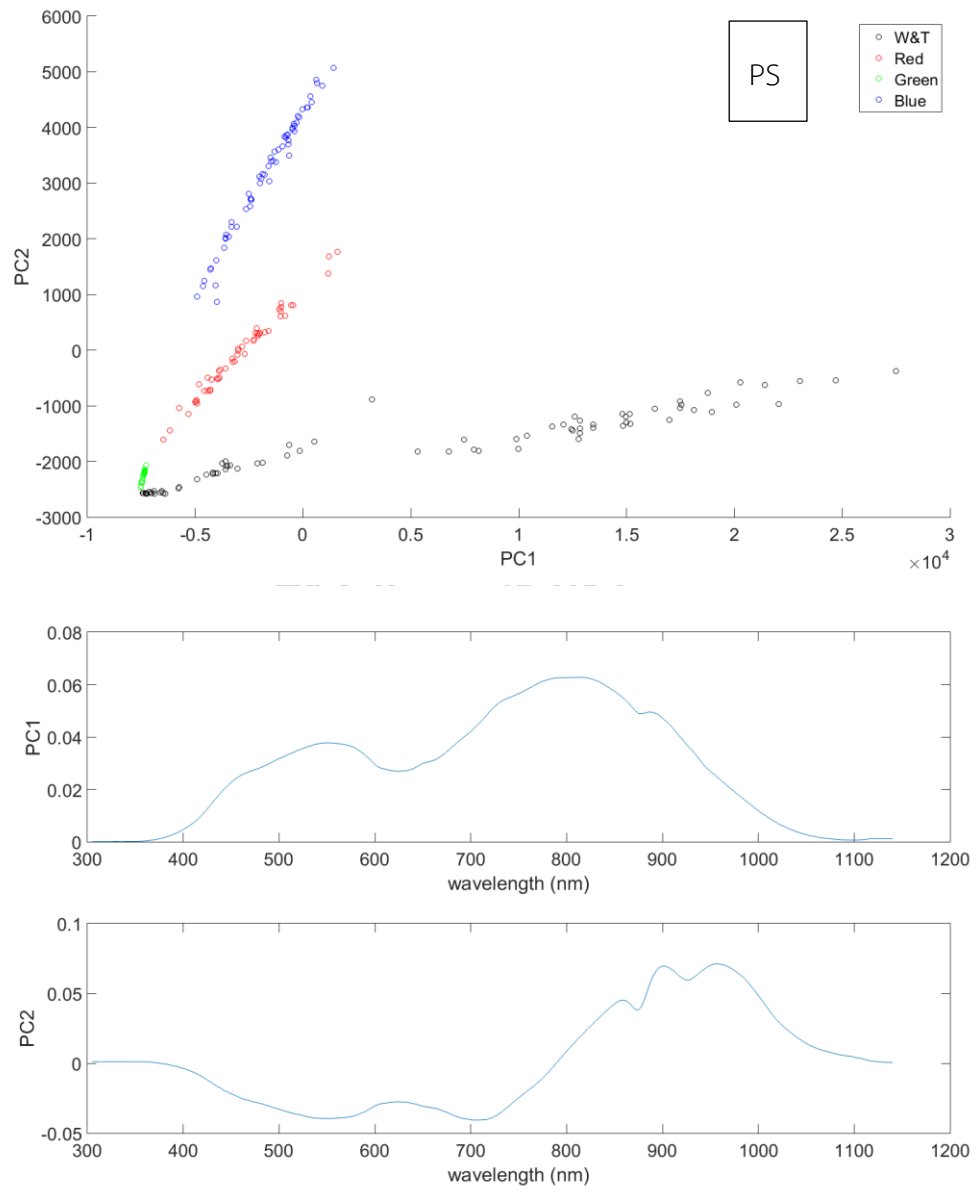


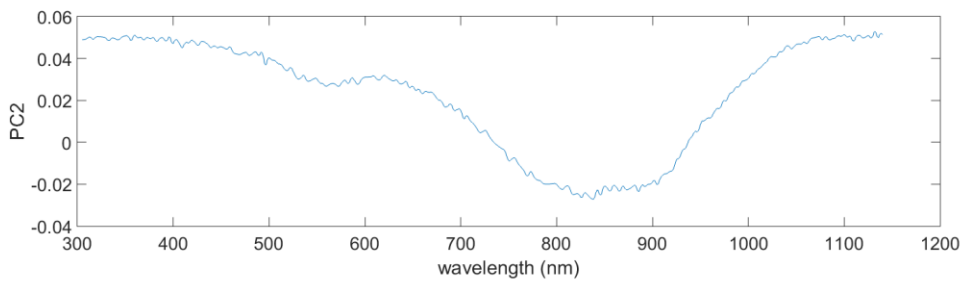
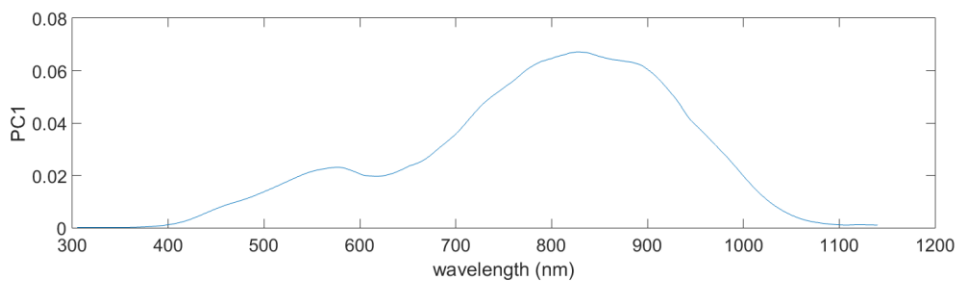
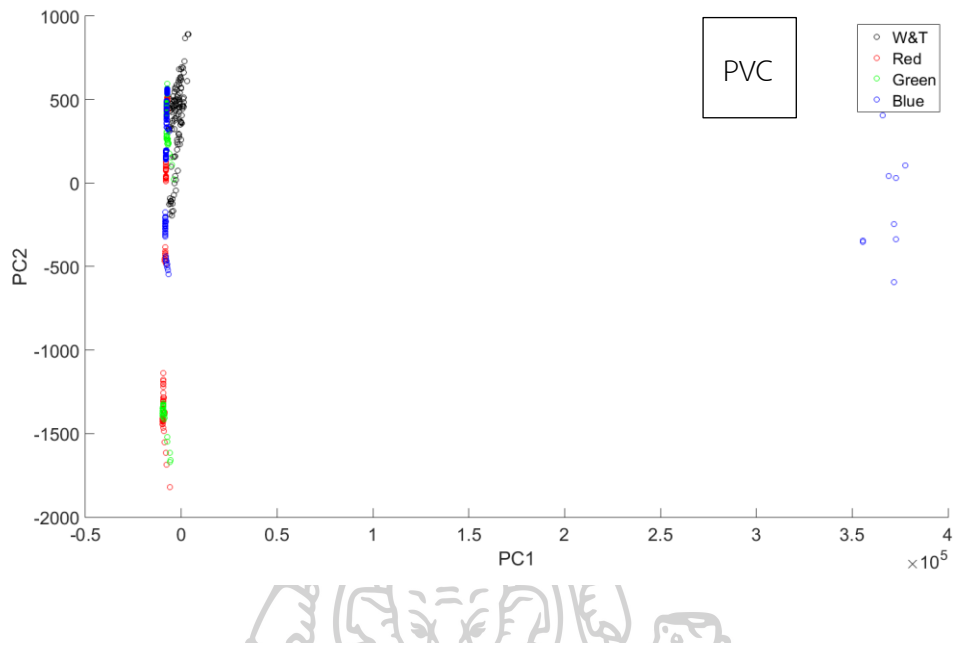
ภาคผนวก ข.1 PCA การคัดแยกสีพอลิเมอร์แต่ละชนิดของเครื่อง Multispectrometer



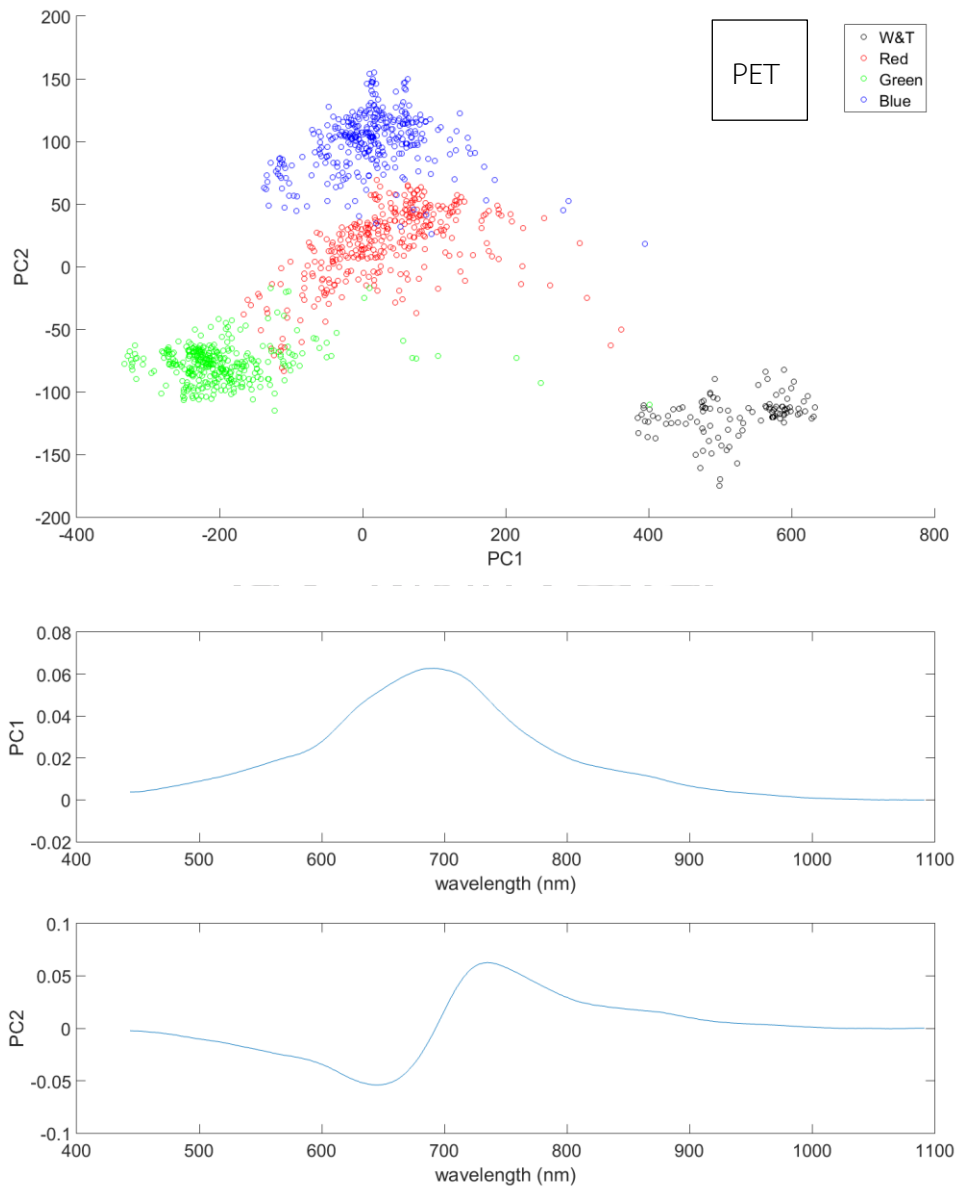


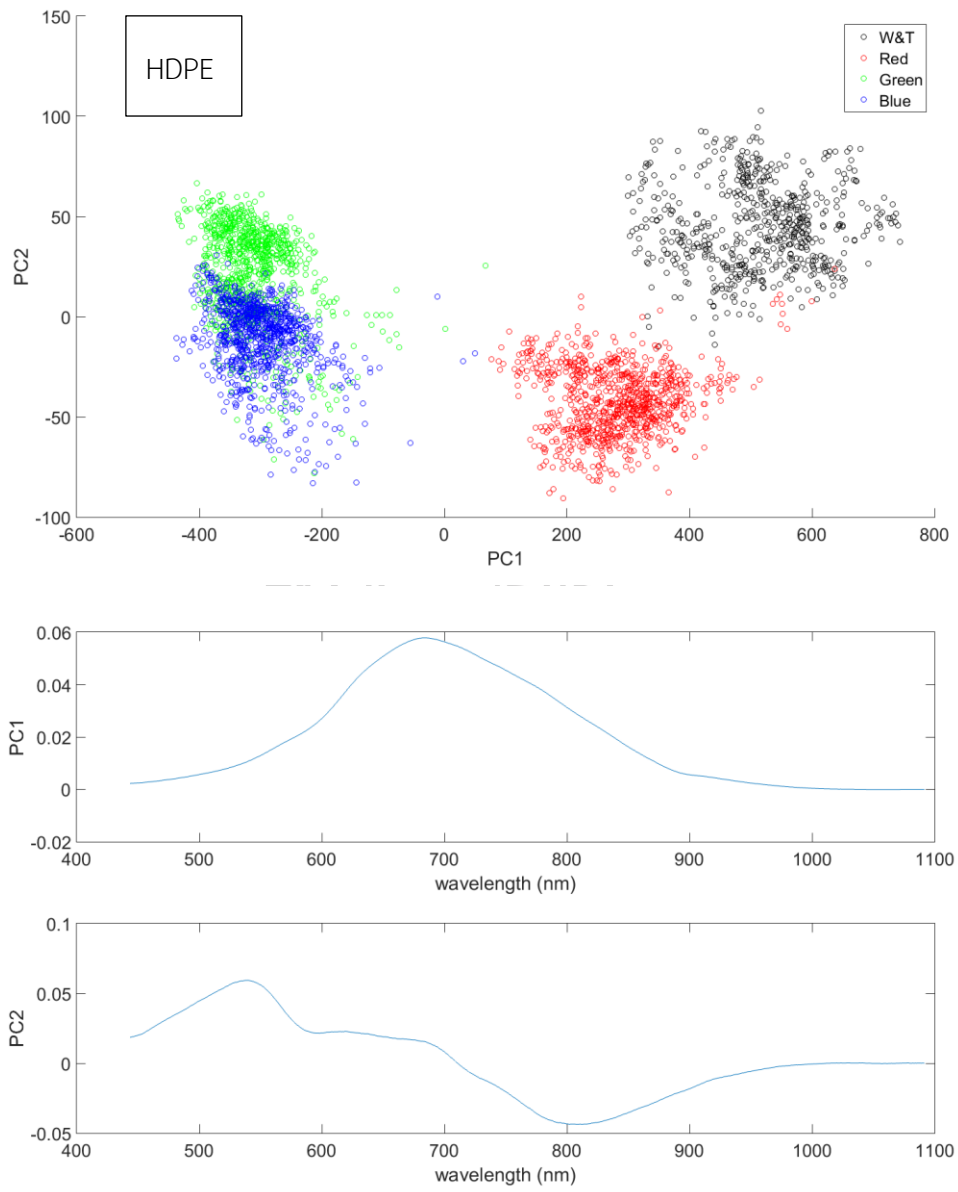


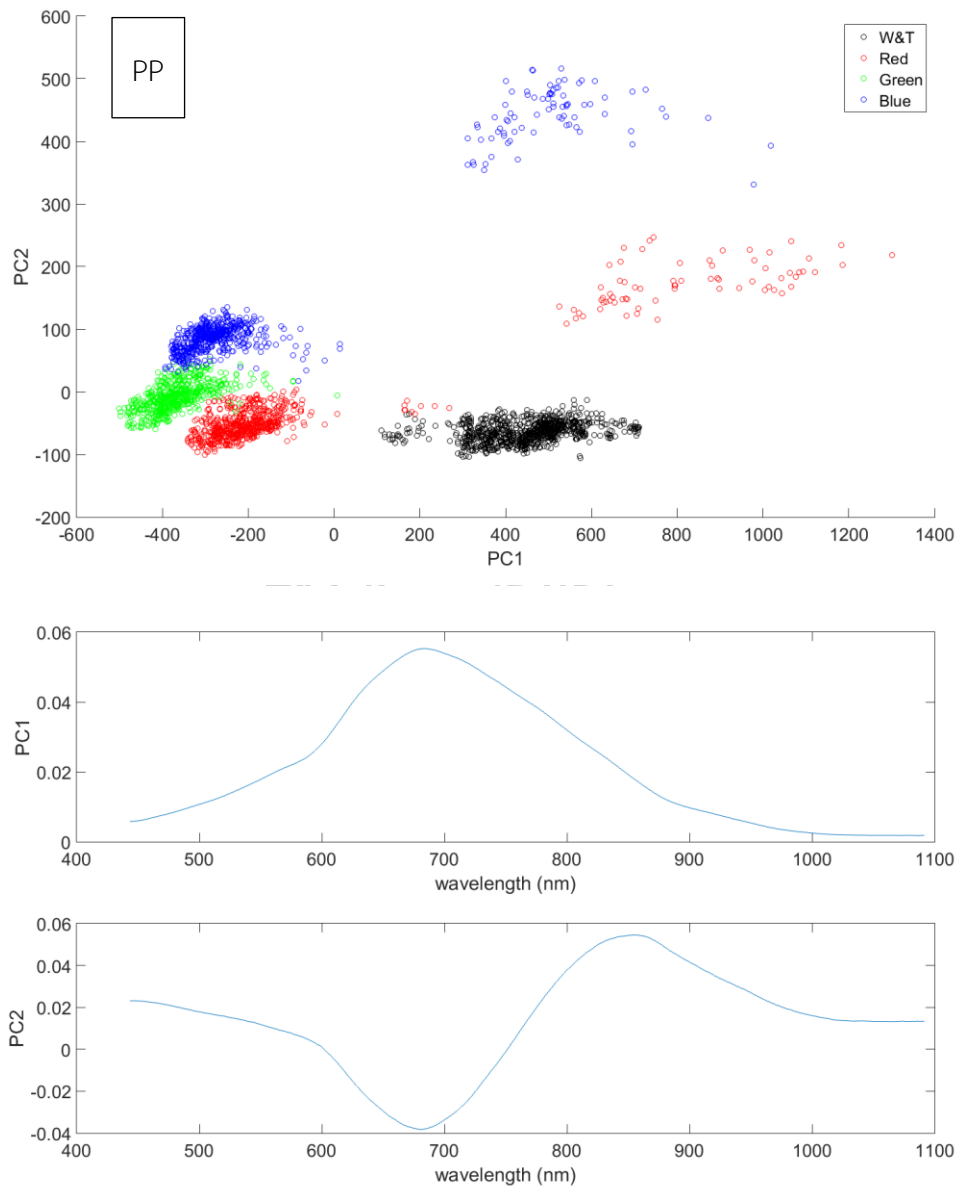


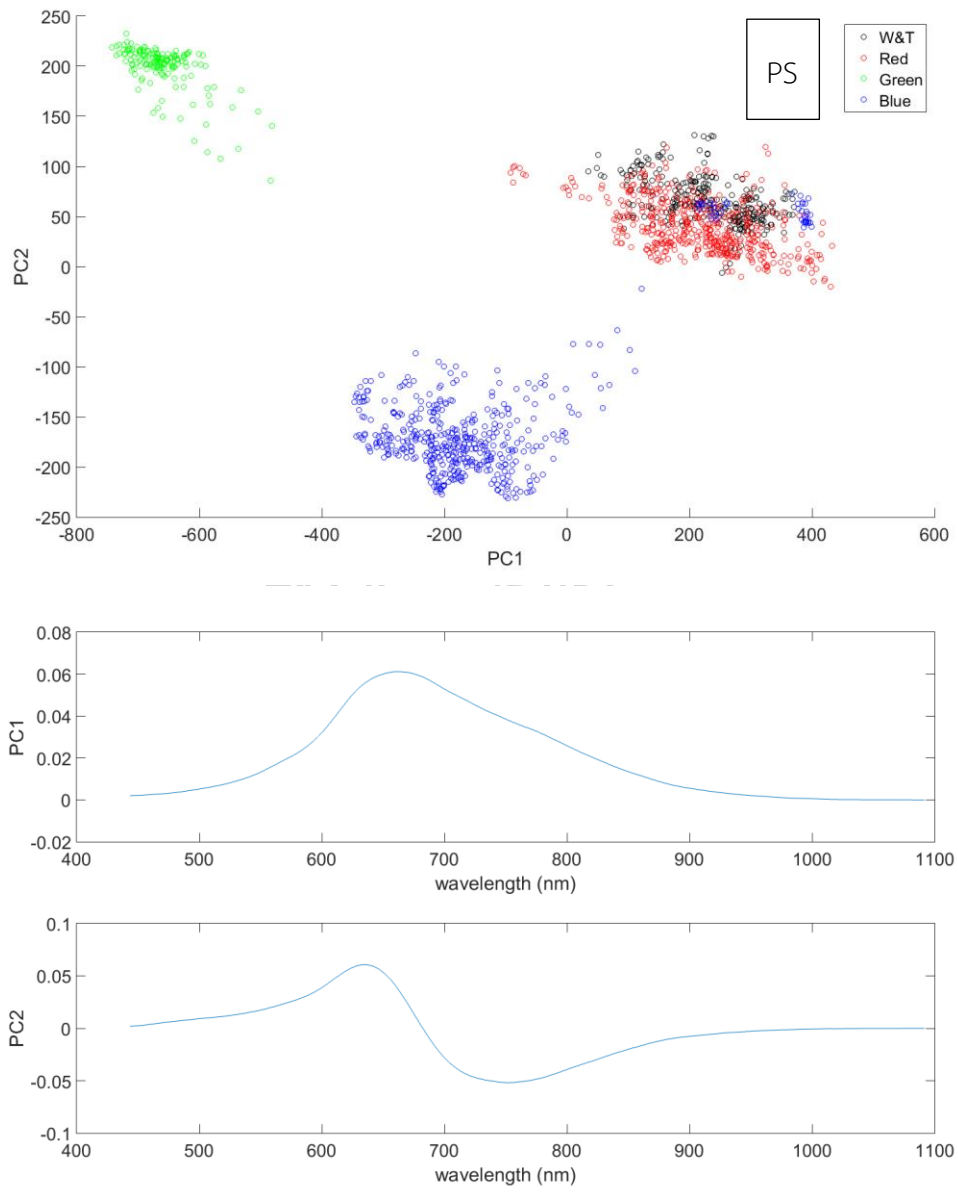


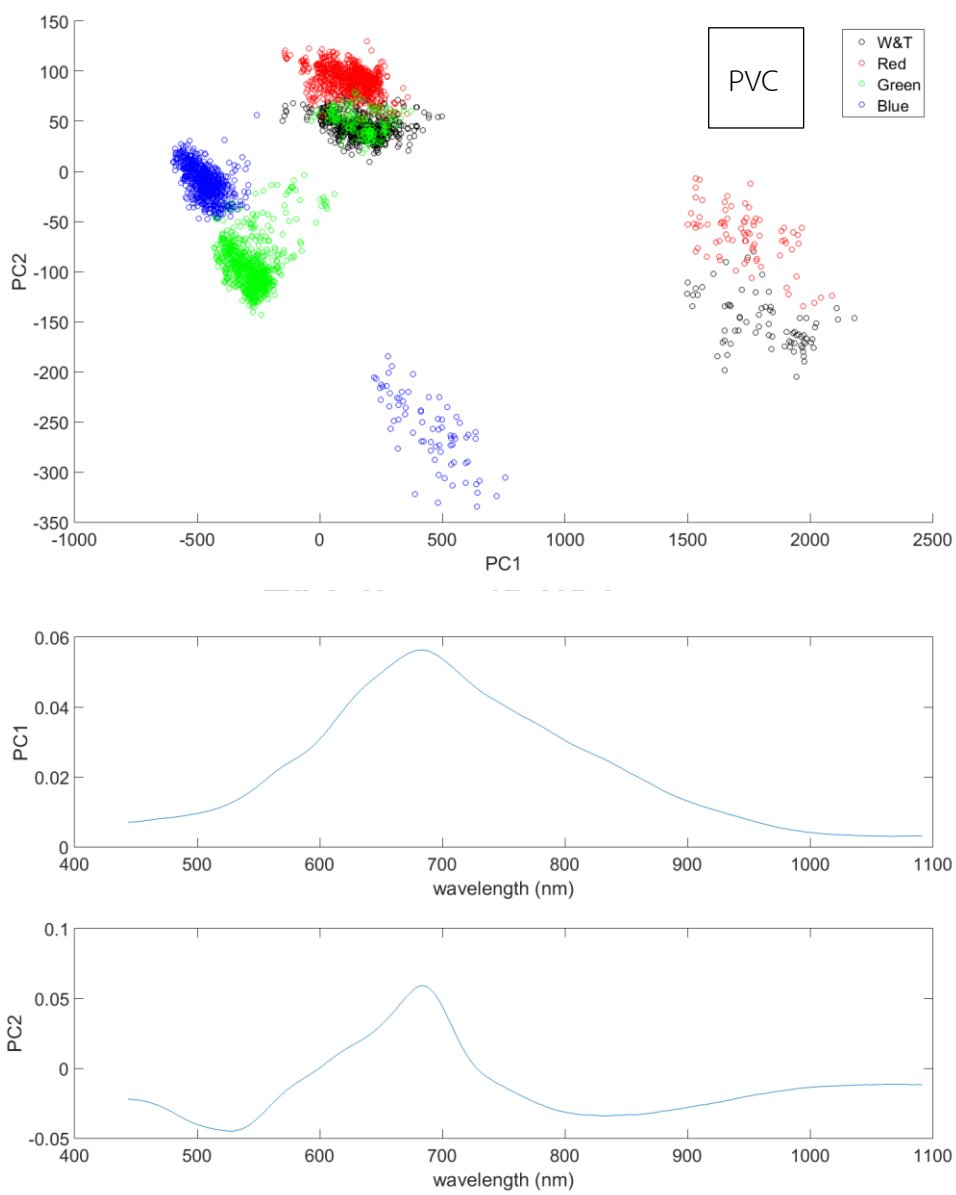
ภาคผนวก ข.2 PCA การคัดแยกสีพอลิเมอร์แต่ละชนิดของเครื่อง NIR line scan Ib



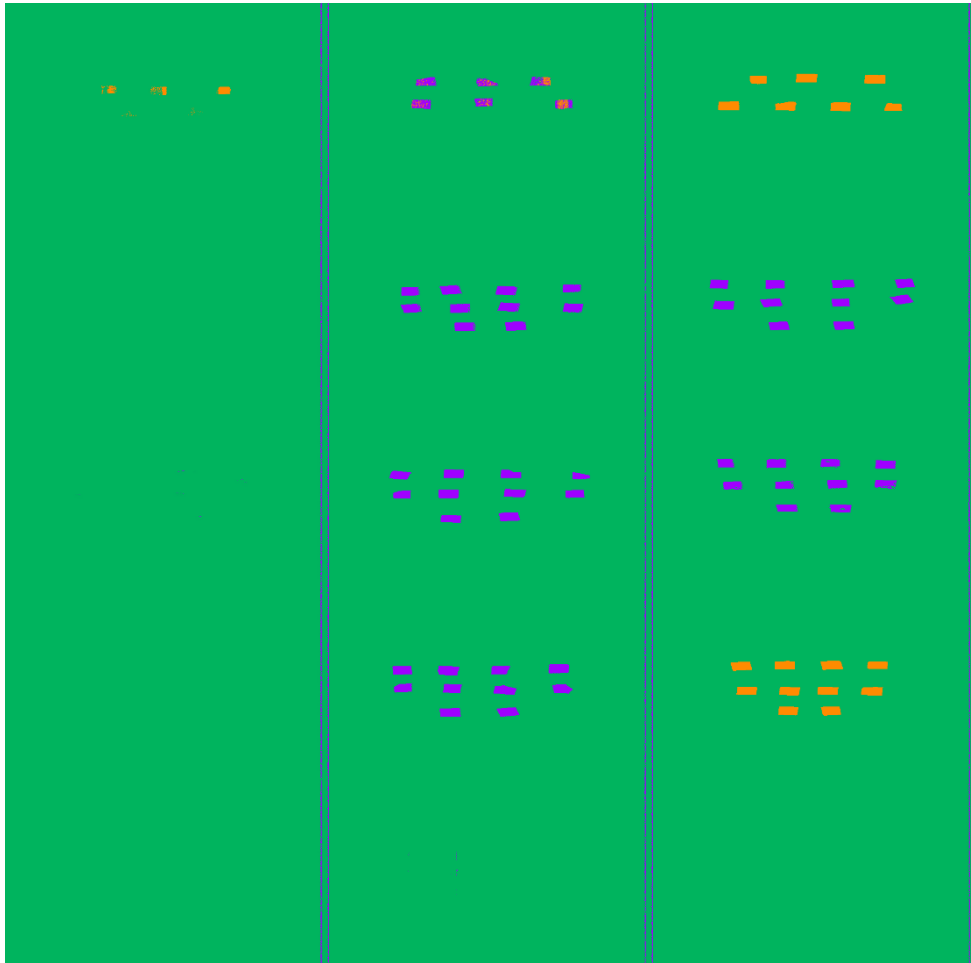








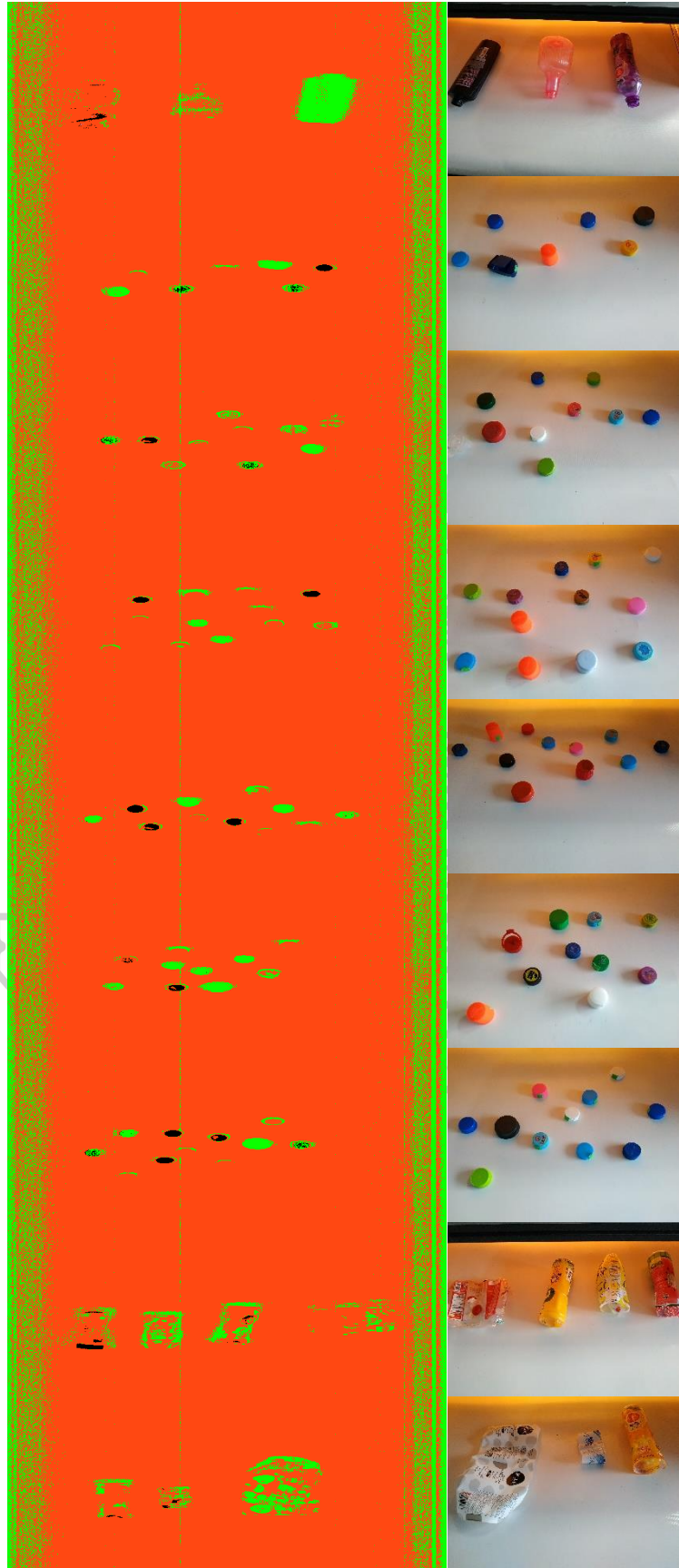
ภาคผนวก ข.3 การทดสอบแบบจำลองทำนายด้วยพอลิเมอร์ตัวอย่าง

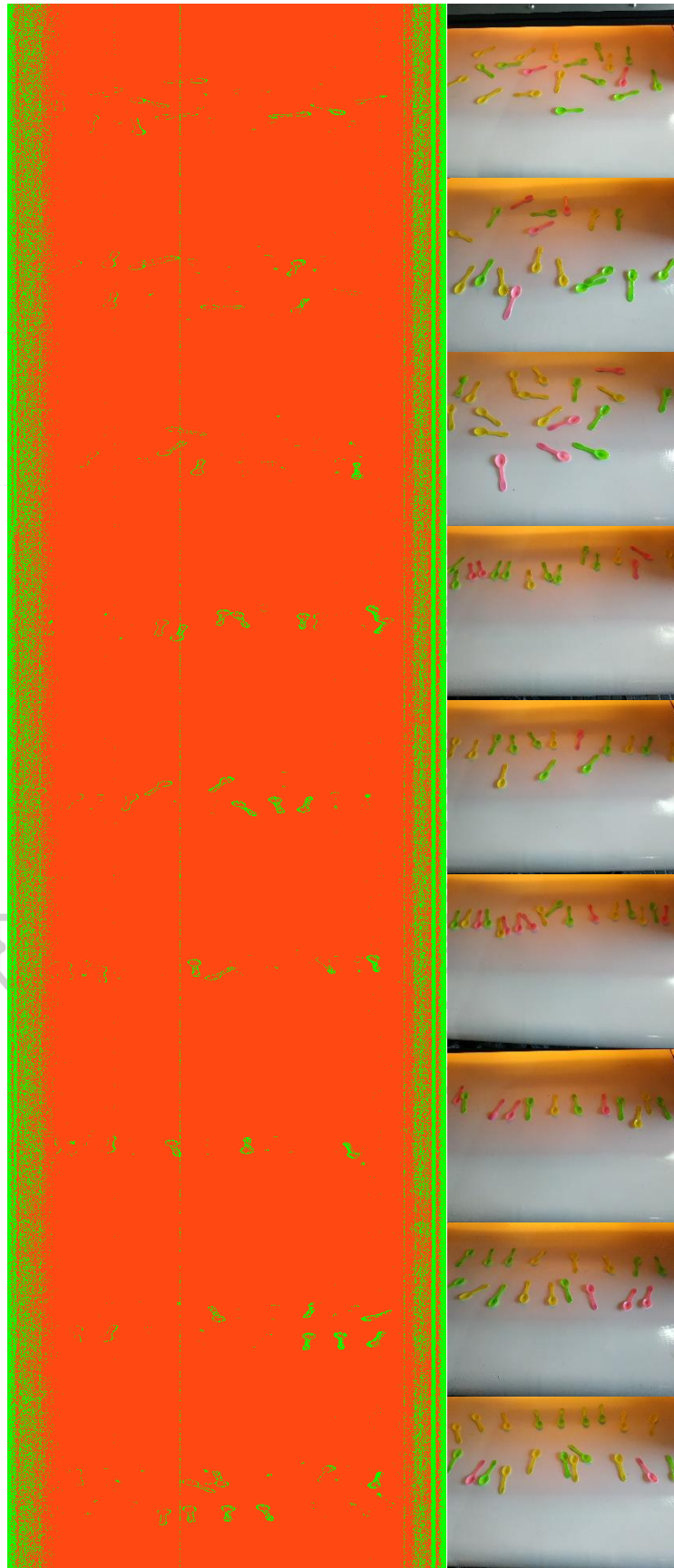


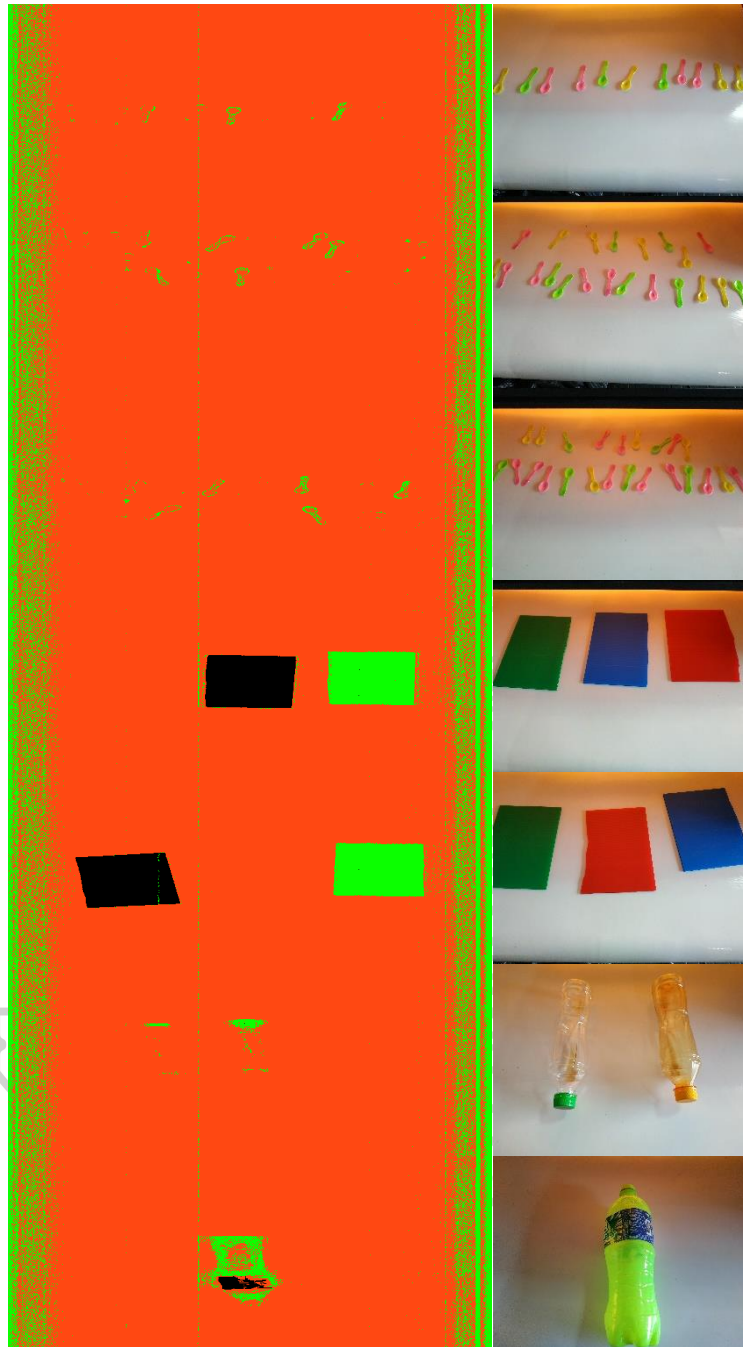
ภาคผนวก ข.4 การทดสอบแบบจำลองทำนายด้วยขยะพลาสติก







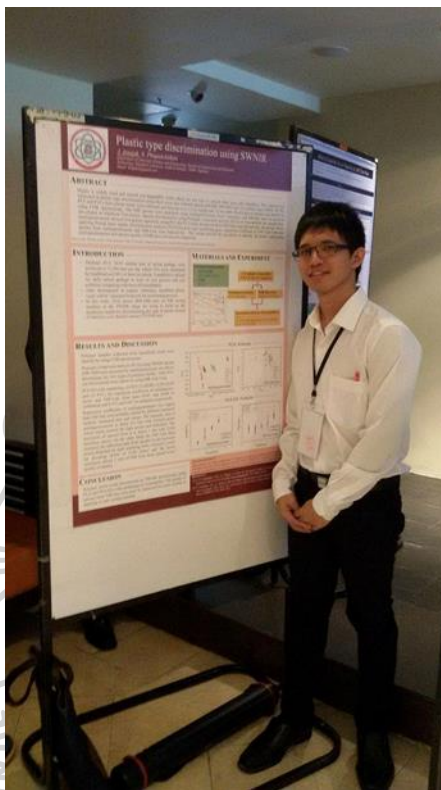






ภาคผนวก ค
การนำเสนอผลงานวิจัย

ภาคผนวก ค.1 การประชุมวิชาการ 3rd International Conference on Applied Physics and Material Applications (ICAPMA2017)



บันทึกการรายงานการประชุม (Proceeding)

3rd International Conference on Applied Physics and Material Applications (ICAPMA2017)
Suan Sunandha Rajabhat University, Thailand



Plastic Type Discrimination using SWNIR

Jirawat Intajak^{1,a*} and Sarawut Phupaichitkun^{1,b}

¹Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000, Thailand

^aintajak.j@gmail.com, ^bphupaichitkun_s@su.ac.th

Abstract

Plastic is widely used and caused non-degradable waste which are not easy to classify their types after landfilled. This research was interested in plastic type discrimination using short wave near infrared spectra (SWNIR, 800-1000 nm). Five plastic types (HDPE, PP, PS, PET and PVC) from plastic waste were collected and then cut in to 1.5 cm length and 1.5 cm width. Plastic type of samples was identify by using FTIR spectroscopy. The NIR spectra were measured using multispectrometer (Tec5, Germany) and NIR-line scan on conveyor (developed at Silpakorn University). Spectra discrimination using Principle component analysis (PCA) on Unscrambler, the spectra from multispectrometer showed five groups separately using PC1 and PC2 while the spectra from NIR-Line scan showed only three groups. When applying Partial least square discrimination analysis (PLS-DA) with type numbering gave, regression coefficient at 0.968 and 0.644 was spectra from multispectrometer and NIR-Line scan respectively. The results showed the possibility to identify the plastic waste using multispectrometer and spectra quality of NIR-line scan have to improve.

Keywords: Plastic waste, Near infrared, NIRs, Principle component analysis, Partial least square discrimination analysis

Introduction

Plastic is very useful material for packages, furniture and many components in car regarding to easily process into various shapes and specific properties of them. The ways to eliminate plastic wastes are landfilled, pyrolysis and burn off. Landfilling was still the first option in many EU countries. In 2014, 25.8 million tons of plastics waste ended up in the official waste streams. 29.7% was recycling 39.5% energy recovery processes while 30.8% still went to landfill [1]. Also in Thailand 2015, 26.85 million tons of mixed garbage were produced or 73,560 tons per day which 72% were eliminated by landfilled [2] and 20 % of them are plastic [3]. Landfilled is optimal for daily mixed garbage in term of cost process and less pollution comparing with burn off immediately. Increasing the land cost and degradation period up to hundred years this method will be incoming problem of this task. One possibility to reduce the landfilled plastic is burning them after degradation of organic waste are finished. Both landfilled plastic and mixed plastic waste must be identified and classified them into their type due to some mixed polymer will decrease their properties such as flexibility, opacity, modulus, process ability etc. To classified type of plastic in industry are using human separation requiring

experience labors, using differential density such as sink-float separation and froth floatation [4]. Identification and classification using near infrared spectroscopy (NIRs) in range 750-2500 nm was successfully in laboratory. Qualitative analysis using the statistic algorithm on comercial software such as The Unscrambler, Matlab etc. is necessary for NIR spectroscopy regarding to unclarified the combination peaks and peak overtone. Sorting machine with full range NIR device is intensive cost due to the detector produced from InGaAs which are rare earth material. Applying the short wavelength near infrared (SWNIR, 800-1000 nm) which could more penetrate than long wavelength (1300-2500 nm) [5] and able to use the CCD sensor is optional to reduce cost and speed up the sorting machine. In this work, laboratory device and CCD sensor on NIR sorting machine in the SWNIR range are using to build up the prediction model for discriminating the type of plastic.

Materials and Experimental

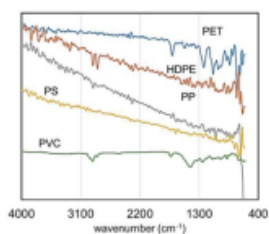
Plastic waste from household product and food packaging consist soap bottle, shampoo bottle, yogurt, frozen food package and water bottle and PVC pipe were cut into square pieces in size 1.5 cm. Cut samples except PVC were confirmed the type by using Fourier Transform Infrared spectroscopy in

Attenuated Total Reflectance mode (ATR-FTIR). The PVC samples were ground and mixed with KBr then compress to a disk before characterized by transmittance mode of FTIR spectrometer (Bruker, Vertex70, Germany). Multispectrometer (Tec5, Germany) and NIR line scan (Silpakorn University) were using for measuring VIS-NIR spectra. The spectra was selected from wavelength in the range of 800 to 1000 nm. Using principle component analysis (PCA) and partial least square discriminant analysis (PLS-DA) with numbering plastic type from 1 to 5, HDPE, PP, PS, PET and PVC, on The Unscrambler software (camo Ver. 9.7) for feasibility study in statistic discrimination.

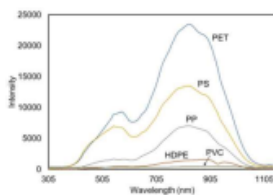
Results and discussion

FTIR Spectra Analysis

Specific wavenumber in FTIR range and specific wavelength in NIR range of HDPE, PP, PS, PET and PVC are presented in Table.1. The IR spectra of plastic waste using ATR-FTIR and FTIR spectroscopy showed in in Figure 1a. Comparing the intensity at specific wavenumber confirm the the type which labeling from the waste. After that the samples were labelling and using for measuring the NIR spectra.



(a)



(b)

Fig. 1 a). FTIR graph and b). VIS-NIR from multispectrometer of 5 plastic wastes

In Figure 1b showed raw VIS-NIR spectra of 5 polymers from multispectrometer in raw spectrum mode that no sharp peak liked FTIR graph in figure 1a made it could not identified peak with human eyes. So it could use statistic to analyze.

Table. 1 FTIR and NIR peaks of 5 polymers [6,7].

Bond vibration in wavenumber (cm ⁻¹)	HDPE	PP	PS	PET	PVC
C-H stretching	3000-2840	3000-2840	3000-2840	3000-2840	3000-2840
C-H bending aromatic compound			2000-1650		
C=O stretching carboxylic acid					1720-1706
C=C stretching alkene vinylidene				1658-1648	
C=C stretching conjugated alkene			1650-1600		
C=C stretching cyclic alkene			1650-1566		
C-H bending alkane methylene gr.	1465			1465	1465
C-H bending alkane methyl gr.		1450			
		1375			
C-O stretching ester					1210-1163
C-H bending alkene mono substituted		995-985			
C=C bending alkene (trans)		915-905			
C-Cl stretching				850-550	
C-H bending 1,2,3-tri substituted				780±20	
C=C bending alkene (cis)					730-665
C-H bending 1,2,3-tri substituted	780±20				780±20
Bond vibration in wavelength (nm)	HDPE	PP	PS	PET	PVC
3×C-H stretching + 2×C-C stretching	840	840	840	840	840
C-H stretching 3 rd overtone benzene			874	874	
C-H stretching 3 rd overtone CH ₃		900			
C-H stretching 3 rd overtone CH ₂	913	913	913	913	913
C-H stretching 3 rd overtone CH ₂	938	938	938	938	938

PCA Analysis

NIR spectra have many combination and overtone of peaks especially in SWNIR (800-1000 nm) range. The type of polymer can't discriminate directly like previous case. In this section, the Principle Component Analysis (PCA) was using for discrimination the type of polymer. The scattering plot of PC1 and PC2 of spectra from

Multispectrometer (Tec5) and NIR line scan presented in Figure 2a and 2b respectively. The results of Multispectrometer showed that experimental points discriminated into five groups according to their type of polymers used in research. The scattering plot of NIR line scan showed only two groups which are PVC and mixed of HDPE, PP, PET and PS.

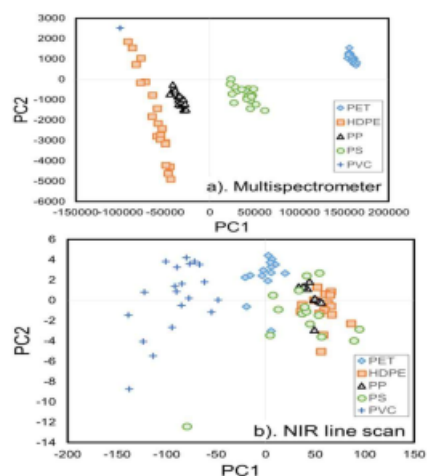


Fig. 2 PCA of a). multispectrometer and b). NIR-line scan

PLS-DA Analysis

Numbering technique is the idea from a recycled symbol and is the easiest way to identified that they should stayed separately from each other. PET, HDPE, PP, PS and PVC were numbering respectively from 1 to 5 which was a guidance number in PLS-DA. Using full cross validation method, the regression coefficient are 0.947 in calibration and 0.937 in validation for Multispectrometer (Tec5) and 0.644 in calibration and 0.417 in validation for NIR-line scan.

In Fig. 3a showed the numbering and prediction of each polymer in multispectrometer that only number 1, 3 and 5 were reliable because prediction of number 1 and 3 were close to numbering and 5 was a one point error of prediction. But in number 2 and 4, the prediction were distributed in wide range due to their chemical structure that have CH_2 in backbone more than others. In Fig. 3b, the prediction were spread out in every polymer therefore. NIR line scan could not be reliable in PLS-DA method. These probably caused by different instrument that multispectrometer is a point scan but another is line scan.

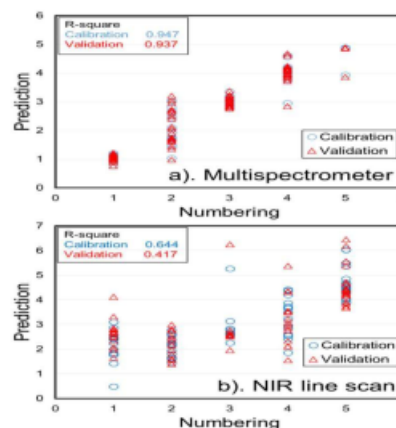


Fig.3 Regression coefficient (R-square) of PLS-DA of a). multispectrometer and b). NIR line scan

Another reason that can explained about differentiated of R-square and efficiency of two instruments was bit depth of sensor that Multispectrometer had 12 bit sensor but NIR line scan had 8 bit sensor, so 12 bit sensor could gave more picture resolution that can saw more peak of spectrum than 8 bit sensor which gave more smooth spectrum. This means two machines can discriminated polymer type but multispectrometer had more reliability than NIR line scan should be improved.

Conclusion

Polymer waste could discriminated by SWNIR spectroscopy cooperate with statistical analysis on PCA and PLS-DA with numbering of The Unscrambler software. The possibility to identify the plastic waste of multispectrometer was very good but NIR-line scan must be improved for more reliable to applying in auto sorting machine.

Acknowledgement

This research was fund by department of Materials Science and Engineering and Silpakorn University Research and Development Institute (SURDI 56/02/02.07). And authors would like to thank you department of Food Technology for multispectrometer and Unscrambler software.

References

- [1] PlasticsEurope, *Plastics- the facts 2016*. An analysis of European plastics production, demand and waste data, 2016.

- [2] department, P.c., *Situation of waste and hazardous waste management in the country.* 2015.
- [3] T. Srisathit, *Solid Waste Management in Community.* 2016.
- [4] Gundupalli, S.P., S. Hait, and A. Thakur, *A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling,* waste management, 2017. **60**: p. 56-74.
- [5] Y. Uwadaira, et al., *Identification of informative bands in the shortwavelength NIR region for non-invasive blood glucose measurement.* Biomedical Optics EXPRESS 2730, 2016. 7(7).
- [6] UCDAVIS. *chemistry libretxts.* 29 Nov 2014 [cited 2017; Available from: https://chem.libretxts.org/Reference/Reference_Tables/Spectroscopic_Parameters/Infrared_Spectroscopy_Absorption_Table.
- [7] B.G. Osborne, T. Fearn, and P.H. Hindle, *Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage*

รายการอ้างอิง

1. Uçar, S., A.R. Özkan, and S. Karagöz, *Co-pyrolysis of waste polyolefins with waste motor oil*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2016. **119**: p. 233-241.
2. Brebu, M., et al., *The effect of PVC and/or PET on thermal degradation of polymer mixtures containing brominated ABS*. Fuel, 2004. **83**(14-15): p. 2021-2028.
3. เตียรธสุวรรณ, ส., นโยบายและแนวทางการจัดการขยะพลาสติกของประเทศไทย, กรมควบคุมมลพิษกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, Editor. 2561: การฝึกอบรมการลดและคัดแยกขยะมูลฝอยในหน่วยงานภาครัฐ ครั้งที่ 4, p. 11-13.
4. กรมควบคุมมลพิษกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, ร่างรายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2560. 2561.
5. Anzano, J., et al., *Classification of polymers by determining of C1: C2: CN: H: N: O ratios by laser-induced plasma spectroscopy (LIPS)*. Polymer Testing, 2008. **27**(6): p. 705-710.
6. Chattopadhyay, J., et al., *Catalytic co-pyrolysis of paper biomass and plastic mixtures (HDPE (high density polyethylene), PP (polypropylene) and PET (polyethylene terephthalate)) and product analysis*. Energy, 2016. **103**: p. 513-521.
7. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้ในอุตสาหกรรมเกษตร. 2552.
8. Park, C.-H., H.-S. Jeon, and J.-K. Park, *PVC removal from mixed plastics by triboelectrostatic separation*. Journal of Hazardous materials, 2007. **144**(1-2): p. 470-476.
9. Ragaert, K., L. Delva, and K. Van Geem, *Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste*. Waste Management, 2017. **69**: p. 24-58.
10. Bauer, M., et al., *Sink–float density separation of post-consumer plastics for feedstock recycling*. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2018. **20**(3): p. 1781-1791.

11. Lupo, E., et al., *Investigation on an innovative technology for wet separation of plastic wastes*. Waste management, 2016. **51**: p. 3-12.
12. Yukihiro Ozaki, W. Fred McClure, and A.A. Christy, *Near-infrared spectroscopy in food science and technology*. 2007, United states of America: John Wiley & Sons, Inc.
13. Lin, M., et al., *Infrared (IR) spectroscopy—near-infrared spectroscopy and mid-infrared spectroscopy*. Infrared spectroscopy for food quality analysis and control, 2009: p. 119-143.
14. Tatzer, P., M. Wolf, and T. Panner, *Industrial application for inline material sorting using hyperspectral imaging in the NIR range*. Real-Time Imaging, 2005. **11**(2): p. 99-107.
15. Serranti, S., A. Gargiulo, and G. Bonifazi, *Classification of polyolefins from building and construction waste using NIR hyperspectral imaging system*. Resources, Conservation and Recycling, 2012. **61**: p. 52-58.
16. Workman Jr, J.J., *Near-Infrared Spectroscopy of Polymers and Rubbers*. Encyclopedia of Analytical Chemistry: Applications, Theory and Instrumentation, 2006.
17. Bruno, E.A., *Automated sorting of plastics for recycling*. infohouse. p2ric. org, 2000.
18. Y.Tachwali, Y.AL-Assaf, and A.R.AL-Ali, *Automatic multistage classification system for plastic bottles recycling*. Resources, Conservation and Recycling 2007. **52**: p. 266-285.
19. Wu, M., et al., *Intraoperative diagnosis of thyroid diseases by fourier transform infrared spectroscopy based on support vector machine*. Int J Clin Exp Med, 2016. **9**(2): p. 2351-2358.
20. Xu, L., et al., *Discrimination of Trichosanthis Fructus from Different Geographical Origins Using Near Infrared Spectroscopy Coupled with Chemometric Techniques*. Molecules, 2019. **24**(8): p. 1550.





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	จิรวุฒน์ อินทจักร
วัน เดือน ปี เกิด	12 กุมภาพันธ์ 2534
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	287/14 ม.15 ถ.สันโค้งน้อย อ.เมือง จ.เชียงราย 57000

