



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์เพื่อตรวจวัดคุณสมบัติของพลาสติกรีไซเคิล

Laser Diode Sensors for Measuring Properties of Recycled Plastic

นามผู้วิจัย นายโกสินทร์ วะศิริ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์สุเนตร พรานนท์สถิตย์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูเกียรติ การะเกตุ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์มงคล รักษาพัชรวงษ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์เพื่อตรวจวัดคุณสมบัติของพลาสติกรีไซเคิล

Laser Diode Sensors for Measuring Properties of Recycled Plastic

โดย

นายโกสินทร์ วะศิริ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2552

โกสินทร์ วะศิริ 2552: การใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์เพื่อตรวจวัดคุณสมบัติของ
พลาสติกกรีซเคล็ด ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขา
วิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์
สุนทร พรานนทีสถิตย์, Ph.D. 71 หน้า

ความไม่แน่นอนของสมบัติทางกลเป็นอุปสรรคอย่างหนึ่งในการควบคุมคุณภาพของ
ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีส่วนผสมของพลาสติกกรีซเคล็ด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการทดสอบสมบัติทางกลมี
ความยุ่งยากและสร้างความเสียหายแก่ชิ้นงาน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาทางเลือกของ
วิธีการตรวจวัดสมบัติทางกล ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกรวดเร็วและไม่สร้างความเสียหายกับชิ้นงาน โดย
ศึกษาจากตัวอย่างผลิตภัณฑ์พลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีนที่จัดทำขึ้นซึ่งมีอัตราส่วนผสมระหว่าง
พลาสติกบริสุทธิ์และพลาสติกกรีซเคล็ดรวมทั้งสีที่แตกต่างกันจำนวน 32 แบบ

เทคนิคที่เลือกใช้ในงานวิจัยเพื่อวิเคราะห์หาความแตกต่างของแต่ละตัวอย่าง คือการ
ตรวจวัดค่าส่งผ่านแสงย่าน Near-infrared โดยใช้เลเซอร์ไดโอดความยาวคลื่น 1550 nm และโฟโต
ไดโอดเป็นแหล่งกำเนิดแสงและตัวตรวจวัดแสงตามลำดับ แล้วนำผลจากการวัดไปหาความ
สัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ร่วมกันระหว่างค่าส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมกรีซเคล็ด, ค่าความทนแรง
ดึง และค่าความทนแรงกระแทก จากนั้นเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลจากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตร
มิเตอร์

จากผลการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับคุณสมบัติของ
พลาสติกกรีซเคล็ดได้แก่ อัตราส่วนผสมกรีซเคล็ดและค่าสมบัติทางกลที่ทดสอบสามารถพิจารณาเป็น
ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นได้ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากกว่า 0.8 ดังนั้นจึงสามารถ
ตรวจวัดเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง, อัตราส่วนผสมกรีซเคล็ด, ค่าความทนแรงดึง และค่าความทนแรง
กระแทกด้วยเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นได้ โดยวิธีการใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์มี
ประสิทธิภาพเทียบเท่ากับการใช้สเปกโตรมิเตอร์ นอกจากนี้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นยังมี
ต้นทุนและค่าบำรุงรักษาต่ำ, ขนาดเล็ก และใช้พลังงานน้อยกว่าเครื่องสเปกโตรมิเตอร์

Kosin Wasasiri 2009: Laser Diode Sensors for Measuring Properties of Recycled Plastic. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Ms. Suneat Pranonsatit, Ph.D. 71 pages.

Uncertainty of mechanical properties is one of the obstacles to control quality of plastic products that are partially made of recycled plastic. Generally, mechanical testing is a complicated and destructive method. The purpose of this research was to study an alternative measuring method of mechanical properties. The method should be fast, convenient and non-destructive. The plastic sample products in this study are 32 Polypropylene samples that made from different recycled composition percentages and colors.

A suitable candidate technique for analyzing the difference of the samples is the application of optical transmittance of near-infrared band. A laser diode of 1550 nm wavelength and a photodiode were employed as a light source and optical detector, respectively. The measured results were then used to develop mathematical relationships between optical transmittance and recycled composition, tensile strength and impact strength. Subsequently, the results were compared with those obtained from a spectrometer.

From the experiments, the relationship between optical transmittance and recycled plastic properties, i.e. composition percentages and mechanical properties, can be considered as a linear relationship, with coefficient of determination (R^2) over 0.8. Therefore, recycled composition, tensile strength and impact strength of the plastic samples can be determined by the use of the demonstrated laser diode sensor, with efficiency equivalent to a spectrometer sensing method. The advantages of laser diode sensor are lower investment and maintenance costs, smaller size and lower power consumptions than a spectrometer.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ อ. ดร. สุเนตร พรานนท์สถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนและมอบความรู้แก่ข้าพเจ้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณพ่อและแม่ ตลอดจนเพื่อนๆทุกคน ที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อบกพร่องประการใด ข้าพเจ้ายินดีรับข้อเสนอแนะ และขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

โกสินทร์ วะศิริ

มีนาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	12
อุปกรณ์	12
วิธีการ	13
ผลและวิจารณ์	48
ผล	48
วิจารณ์	62
สรุปและข้อเสนอแนะ	67
สรุป	67
ข้อเสนอแนะ	68
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	69
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	71

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการบ่งชี้ชนิดพลาสติกระหว่างวิธีที่ใช้สเปกโตรมิเตอร์กับวิธีที่ประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอด	11
2	ความต้องการใช้เม็ดพลาสติกของไทย	14
3	การแบ่งประเภทของพลาสติกรีไซเคิลชนิดโพลีโพรพิลีน	15
4	ชื่อและลักษณะของตัวอย่างพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง	17
5	แรงดันเอาท์พุทที่วัดได้จากการทดสอบวงจรตรวจวัดความเข้มแสง	34
6	อัตราส่วนเฉลี่ยของแรงดันเอาท์พุท (V_o) ที่เกิดจากกระแสมีดเทียบกับแสงเลเซอร์	35
7	เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ตรวจวัดได้ ณ เวลาต่างๆ ขณะไม่มีตัวอย่าง	40
8	ผลการตรวจวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยสเปกโตรมิเตอร์และเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์	48
9	ผลการตรวจวัดค่าอัตราส่วนผสมรีไซเคิลด้วยสเปกโตรมิเตอร์	50
10	ผลการตรวจวัดค่าอัตราส่วนผสมรีไซเคิลด้วยเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น	51
11	ผลการตรวจวัดค่าความทนแรงดึงด้วยสเปกโตรมิเตอร์	54
12	ผลการตรวจวัดค่าความทนแรงดึงด้วยเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น	55
13	ผลการตรวจวัดค่าความทนแรงกระแทกด้วยสเปกโตรมิเตอร์	58
14	ผลการตรวจวัดค่าความทนแรงกระแทกด้วยเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น	59
15	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของวิธีสเปกโตรมิเตอร์และเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์เทียบกับค่าที่วัดได้จริง	62

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แนวโน้มการเสื่อมคุณภาพสมบัติทางกลของพลาสติกเมื่อเวลาผ่านไป	4
2	ความสัมพันธ์ของสมบัติทางกลกับอัตราส่วนผสมพลาสติกบริสุทธิ์	5
3	พฤติกรรมของแสงที่กระทำกับตัวอย่างพลาสติก	7
4	ค่าสเปกตรัมช่วง 350-2500 nm ของตัวอย่างพลาสติกชนิดต่างๆ	8
5	เปรียบเทียบการทำงานระหว่าง (ก) การใช้สเปกโตรมิเตอร์ และ (ข) การประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอด	9
6	เปรียบเทียบผลการบ่งชี้ชนิดของพลาสติก PET และ PVC ระหว่าง (ก) ผลของการใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์และ (ข) ผลของการประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอดที่ความยาวคลื่น 1722 nm	10
7	ลักษณะชิ้นงานกล่อง	16
8	ลักษณะชิ้นงาน Dumbbell	17
9	เครื่อง Universal testing machine ที่ใช้ในการทดสอบค่าความทนแรงดึง	19
10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดึงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิล	20
11	การเตรียมชิ้นงานทดสอบความทนแรงกระแทกแบบ I-zod (V-notched)	21
12	เครื่อง Pendulum Impact Tester ที่ใช้ในการทดสอบค่าความทนแรงกระแทก	21
13	ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานหลังการทดสอบ	21
14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงกระแทกกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิล	22
15	เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	23
16	การตัดชิ้นงานตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	23
17	การวางตัวอย่างในเครื่องสเปกโตรมิเตอร์	24
18	ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างไม่ผสมรีไซเคิลที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิลต่างๆ	24
19	ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีน้ำเงินที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิลต่างๆ	24
20	ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีแดงที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิลต่างๆ	25
21	ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีเขียวที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิลต่างๆ	25
22	ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีต่างๆที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิล 0%	25
23	ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีต่างๆที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิล 10%	26

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีต่างๆที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิล 20%	26
25	ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีต่างๆที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิล 30%	26
26	ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีต่างๆที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิล 40%	27
27	ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีต่างๆที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิล 50%	27
28	ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีต่างๆที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิล 75%	27
29	ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีต่างๆที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิล 100%	28
30	ระบบการทำงานของเซนเซอร์	29
31	การติดตั้งเซนเซอร์	30
32	การบานออกของลำแสงเลเซอร์กับความเข้มแสงที่โฟโตไดโอดตรวจวัดได้	30
33	การคำนวณระยะห่างที่ทำให้โฟโตไดโอดสามารถตรวจวัดแสงได้ทั้งหมด	31
34	ระยะห่างในการติดตั้งตัวเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง	31
35	การต่อเลเซอร์ไดโอดกับวงจรขับ	32
36	การต่อโฟโตไดโอดในโหมด Photoconductive	33
37	ความสัมพันธ์ระหว่าง V_O กับ R_L และ V_{Bias} ที่เกิดจากแสงเลเซอร์	34
38	ความสัมพันธ์ระหว่าง V_O กับ R_L และ V_{Bias} ที่เกิดจากกระแสมีด	34
39	แผนภาพการทำงานในส่วนประมวลผลและแสดงผล	36
40	แผนภาพการทำงานของโปรแกรมในส่วนประมวลผล	37
41	การต่อวงจรขยายสัญญาณกับไมโครคอนโทรลเลอร์	38
42	การต่อ LCD กับไมโครคอนโทรลเลอร์	39
43	การต่อสวิตช์กับไมโครคอนโทรลเลอร์	39
44	ลักษณะอุปกรณ์ทั้งหมดของวงจรเซนเซอร์	40
45	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลของตัวอย่างแต่ละสี จากการวัดด้วยสเปกโตรมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 1550 nm	41
46	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลของตัวอย่างแต่ละสี จากการวัดด้วยเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น	42
47	แผนภาพการทำงานของโปรแกรมที่ได้พัฒนาแล้ว	47

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
48	เปรียบเทียบผลการตรวจวัดอัตราส่วนผสมระหว่างการเตรียมตัวอย่างกับสเปกโตรมิเตอร์และเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ของตัวอย่างทั้ง 32 แบบ	53
49	เปรียบเทียบผลการตรวจวัดค่าความทนแรงดึงระหว่าง Universal testing machine กับสเปกโตรมิเตอร์และเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ของตัวอย่างทั้ง 32 แบบ	57
50	เปรียบเทียบผลการตรวจวัดค่าความทนแรงกระแทกระหว่าง Pendulum Impact Tester กับสเปกโตรมิเตอร์และเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ของบางตัวอย่าง	61
51	จะการลดลงของความเข้มแสงที่ตรวจวัดได้ตามระยะห่างระหว่างตัวอย่างกับตัวตรวจวัดแสง	64
52	ค่าคงที่ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมรีไซเคิลกับค่าการส่งผ่านแสงของวิธีที่ใช้สเปกโตรมิเตอร์และวิธีที่ใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์	65
53	ความชันของสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมรีไซเคิลกับค่าการส่งผ่านแสงของวิธีที่ใช้สเปกโตรมิเตอร์และวิธีที่ใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์	66

การใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์เพื่อตรวจวัดคุณสมบัติของพลาสติกรีไซเคิล

Laser Diode Sensors for Measuring Properties of Recycled Plastic

คำนำ

ปัจจุบันมีการใช้งานพลาสติกในผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น ถุงพลาสติก ขวดน้ำดื่ม ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนยานยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า ฯลฯ อาจกล่าวได้ว่าผลิตภัณฑ์พลาสติกเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันและมีแนวโน้มความต้องการใช้งานที่สูงขึ้น ทำให้ปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มมากขึ้นและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การกำจัดขยะพลาสติกด้วยการนำมารีไซเคิลเป็นวิธีที่ดีที่สุดวิธีหนึ่ง นอกจากจะช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมแล้วยังสามารถลดต้นทุนการผลิตได้อีกด้วย เนื่องจากพลาสติกรีไซเคิลมีราคาถูกกว่าพลาสติกบริสุทธิ์

อุปสรรคอย่างหนึ่งในการใช้งานพลาสติกรีไซเคิลคือการด้อยคุณภาพของสมบัติทางกลบางประการ ทำให้การใช้งานส่วนใหญ่จะนำพลาสติกบริสุทธิ์มาผสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้ได้ตามมาตรฐานของผลิตภัณฑ์นั้นๆ อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนผสมระหว่างพลาสติกบริสุทธิ์และพลาสติกรีไซเคิลนั้นไม่สามารถกำหนดให้แน่นอนได้ เนื่องจากขยะพลาสติกที่ผ่านการรีไซเคิลในแต่ละครั้งจะมีสมบัติทางกลที่แตกต่างกันออกไป จึงต้องทดสอบสมบัติทางกลของผลิตภัณฑ์อยู่เสมอเพื่อควบคุมไม่ให้คุณภาพต่ำกว่ามาตรฐาน แต่เนื่องจากวิธีการทดสอบสมบัติทางกลมีความยุ่งยากใช้เวลานาน อีกทั้งยังสร้างความเสียหายให้แก่ชิ้นงาน ทำให้ไม่สะดวกในการทดสอบ ส่งผลให้มีการผสมพลาสติกรีไซเคิลในปริมาณเพียงเล็กน้อยเพื่อลดความเสี่ยงที่จะทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์พลาสติกต่ำกว่ามาตรฐาน

จากอุปสรรคของการใช้พลาสติกรีไซเคิลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการคิดค้นวิธีการตรวจวัดอัตราส่วนผสมและสมบัติเชิงกลบางประการของผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผสมระหว่างพลาสติกรีไซเคิลกับพลาสติกบริสุทธิ์ โดยเป็นวิธีที่สะดวกรวดเร็วสามารถตรวจวัดได้ทันทีและไม่สร้างความเสียหายกับชิ้นงาน เพื่อเป็นแนวทางในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผสมพลาสติกรีไซเคิล

ทั้งนี้งานวิจัยมุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้เทคนิคทางแสง ซึ่ง Near infrared spectroscopy เป็นเทคนิคหนึ่งในการบ่งชี้ชนิดและปริมาณของสารจากการพิจารณาสเปกตรัมการส่งผ่านหรือดูดกลืนแสง โดยไม่สร้างความเสียหายกับชิ้นงานทดสอบ อย่างไรก็ตาม เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) ที่ใช้ทดสอบนั้นมีราคาค่อนข้างสูง อีกทั้งขอบเขตของงานวิจัยนี้ต้องการตรวจสอบพลาสติกโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) เพียงชนิดเดียว ดังนั้นค่าสเปกตรัมของแต่ละตัวอย่างที่ทดสอบจึงคล้ายกันทั้งหมด ทำให้ไม่มีความจำเป็นต้องสแกนช่วงความยาวคลื่นกว้าง แต่สามารถเจาะจงเลือกเฉพาะช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมเพื่อตรวจวัดความแตกต่างของพลาสติกบริสุทธิ์และพลาสติกรีไซเคิล งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการตรวจวัดค่าการส่งผ่านแสง (Optical transmittance) โดยประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอดเป็นแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่นเดี่ยวและโฟโตไดโอดเป็นตัวตรวจวัดแสงแทนการใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ และพัฒนาเป็นเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดอัตราส่วนผสมรีไซเคิลและค่าสมบัติทางกลบางประการ ได้แก่ ความทนแรงดึง (Tensile strength) และความทนแรงกระแทก (Impact strength) ได้จากการหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับค่าการส่งผ่านแสง โดยเซนเซอร์ดังกล่าวมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ อีกทั้งยังมีต้นทุนต่ำ ขนาดเล็ก ใช้พลังงานน้อย และยังสามารถรักษาได้ง่ายอีกด้วย

วัตถุประสงค์

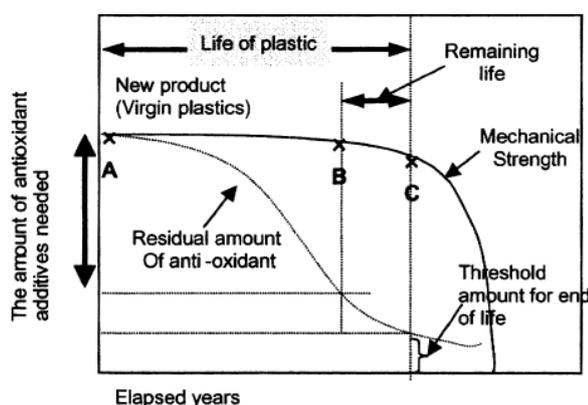
1. เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิค Near infrared spectroscopy และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมของผลิตภัณฑ์พลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีนที่ผสมระหว่างพลาสติกกรีไซเคิลกับพลาสติกบริสุทธิ์จากตัวอย่างพลาสติกที่จัดทำขึ้น
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับค่าสมบัติทางกลบางประการ ได้แก่ ความทนแรงดึงและความทนแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์พลาสติกจากตัวอย่างพลาสติกที่จัดทำขึ้นชนิดโพลีโพรพิลีนที่ผสมระหว่างพลาสติกกรีไซเคิลกับพลาสติกบริสุทธิ์
3. เพื่อศึกษาและออกแบบเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดอัตราส่วนผสม, ความทนแรงดึง และความทนแรงกระแทก ของผลิตภัณฑ์พลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีนที่ผสมระหว่างพลาสติกกรีไซเคิลกับพลาสติกบริสุทธิ์จากตัวอย่างพลาสติกที่จัดทำขึ้น เพื่อให้เป็นวิธีที่สะดวกรวดเร็วสามารถตรวจวัดได้ทันทีและไม่สร้างความเสียหายกับชิ้นงาน ซึ่งเซนเซอร์นี้ประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอดทำให้มีต้นทุนต่ำ ขนาดเล็ก ใช้พลังงานน้อย และบำรุงรักษาง่าย กว่าการใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์
4. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์เทียบกับการใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ในการตรวจวัดอัตราส่วนผสมและคุณสมบัติทางกลบางประการ ได้แก่ ความทนแรงดึงและความทนแรงกระแทก ของผลิตภัณฑ์พลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีนที่ผสมระหว่างพลาสติกกรีไซเคิลกับพลาสติกบริสุทธิ์จากตัวอย่างพลาสติกที่จัดทำขึ้น

การตรวจเอกสาร

สมบัติทางกลของพลาสติกรีไซเคิล

การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติกคือการตรวจวัดสมบัติในการรับภาระหรือแรงกระทำในลักษณะต่างๆในเชิงปริมาณ เพื่อบ่งบอกคุณลักษณะที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์นั้นเช่น เพื่อยืนยันถึงความปลอดภัยในการใช้งาน เพื่อการควบคุมคุณภาพ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการผลิต ดังนั้นสมบัติทางกลจึงมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากไม่ว่าจะเป็นการประยุกต์ใช้พลาสติกในการผลิตผลิตภัณฑ์ใดก็ตาม ผลิตภัณฑ์เหล่านั้นย่อมต้องมีการรับแรงกระทำไม่มากนักน้อย (จินตมัย, 2547)

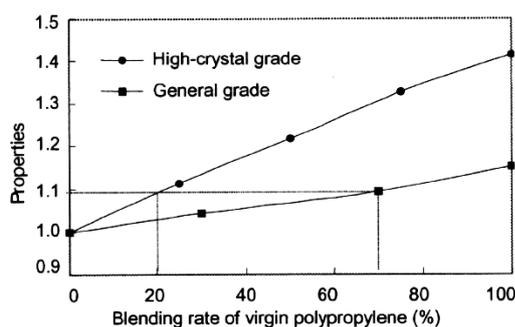
ผลิตภัณฑ์พลาสติกแต่ละชนิดจะมีมาตรฐานของสมบัติทางกลแตกต่างกันตามประเภทการใช้งาน และเมื่อระยะเวลาการใช้งานผ่านไปอาจมีการเสื่อมคุณภาพจากปัจจัยหลายประการทั้งทางกลและทางเคมีเช่น ความร้อน รังสียูวี และลักษณะการใช้งาน ทำให้สมบัติทางกลมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในภาพที่ 1 (Kawaguchi *et al.*, 2005: 134) ดังนั้นเมื่อนำผลิตภัณฑ์พลาสติกดังกล่าวมาหลอมใช้ใหม่ ย่อมได้พลาสติกรีไซเคิลที่มีสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ขั้นตอนการบดขยะพลาสติกเพื่อให้มีขนาดเล็กลงในกระบวนการรีไซเคิลนั้น แรงเฉือนเชิงกลในเครื่องบดจะไปทำลายโซ่ของโพลิเมอร์ให้แตกออก ทำให้ความยาวและน้ำหนักโมเลกุลลดลงซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกล (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2547)



ภาพที่ 1 แนวโน้มการเสื่อมคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเมื่อเวลาผ่านไป

ที่มา: Kawaguchi *et al.* (2005: 134)

เนื่องจากการเสื่อมคุณภาพและความไม่แน่นอนของสมบัติทางกลของพลาสติกกรีไซเคิลทำให้การใช้งานส่วนใหญ่จะนำพลาสติกบริสุทธิ์มาผสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพ ทั้งนี้ Kawaguchi *et al.* (2005: 136) ได้ทดลองปรับปรุงคุณภาพของพลาสติกกรีไซเคิลชนิดโพลีโพรพิลีนด้วยการนำพลาสติกบริสุทธิ์มาผสม ได้ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลโดยรวมกับอัตราส่วนผสมพลาสติกบริสุทธิ์มีลักษณะแนวโน้มนั้นเป็นแบบเชิงเส้น โดยคุณสมบัติที่ดีขึ้นจะขึ้นกับคุณภาพของชนิดพลาสติกบริสุทธิ์ที่นำมาผสมดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ของสมบัติทางกลกับอัตราส่วนผสมพลาสติกบริสุทธิ์

ที่มา: Kawaguchi *et al.* (2005: 136)

เทคนิค Near infrared spectroscopy กับการตรวจวัดตัวอย่างพลาสติก

Near infrared spectroscopy เป็นเทคนิคหนึ่งในการพิสูจน์โครงสร้างสาร โดยการยิงลำแสงอินฟราเรดช่วงความยาวคลื่นประมาณ 800-2500 nm (Inada *et al.*, 2001: 133) ไปยังตัวอย่าง จากนั้นทำการตรวจวัดอัตราส่วนระหว่างความเข้มแสงที่สามารถส่งผ่านกับความเข้มแสงเริ่มต้น จะได้เป็นค่าการส่งผ่านแสงดังสมการที่ 1 เมื่อนำค่าการส่งผ่านแสงของแต่ละความยาวคลื่นมาแสดงภายในกราฟเดียวกันจะได้เป็นค่าสเปกตรัมของสารนั้น (นิพนธ์ และ คณิตา, 2547)

$$T = \left(\frac{I_t}{I_0} \right) \quad (1)$$

เมื่อ T = อัตราการส่งผ่านแสง

I_0 = ความเข้มแสงเริ่มต้น

I_t = ความเข้มแสงส่งผ่าน

ค่าสเปกตรัมของสสารแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไปตามกฎการดูดกลืนแสงของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) โดยกฎของเบียร์กล่าวว่า เมื่อลำแสงความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวแล้ว สัดส่วนของความเข้มแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้จะแปร โดยตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้น และกฎของแลมเบิร์ตกล่าวไว้ว่า เมื่อลำแสงความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวแล้ว สัดส่วนของความเข้มแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้จะไม่ขึ้นกับความเข้มแสงที่กระทบตัวกลางนั้น และความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน เมื่อรวมกฎของเบียร์และแลมเบิร์ตเข้าด้วยกัน สรุปได้ว่าปริมาณความเข้มแสงที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นกับความเข้มข้นและความหนาของตัวอย่าง โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2 และสามารถเขียนสมการในรูปความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มแสงเมื่อตัวกลางที่ทดสอบเป็นตัวกลางเนื้อเดียวที่ไม่ก่อให้เกิดการกระเจิงได้ดังสมการที่ 3 (วิชัย และคณะ, 2526)

$$A = \epsilon dc \quad (2)$$

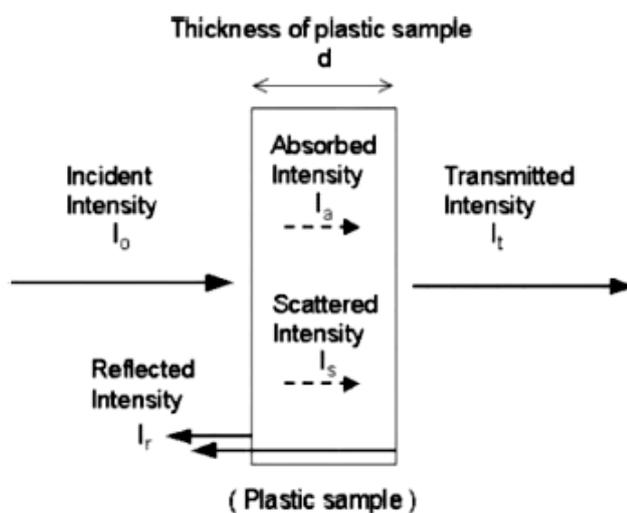
$$A = \log \left(\frac{I_0}{I_T} \right) \quad (3)$$

เมื่อ A = ค่าการดูดกลืนแสง
 ϵ = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
 d = ความหนาของตัวอย่าง
 c = ความเข้มข้นของสาร
 I_T = ความเข้มแสงส่งผ่าน สำหรับตัวกลางที่ไม่ก่อให้เกิดการกระเจิง

โดยทั่วไปตัวอย่างพลาสติกมักเป็นตัวอย่างแบบกระเจิงแสง แสงที่กระทำกับตัวอย่างจะมีพฤติกรรมส่งผ่าน, ดูดกลืน, สะท้อน และกระเจิง ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าดังกล่าวจะเป็นไปดังสมการที่ 4 (Inada *et al.*, 2001: 139-142)

$$I_0 = I_a + I_r + I_s + I_t \quad (4)$$

เมื่อ I_a = ความเข้มแสงที่ถูกดูดกลืน
 I_r = ความเข้มแสงที่สะท้อนกลับ
 I_s = ความเข้มแสงที่เกิดการกระเจิง



ภาพที่ 3 พฤติกรรมของแสงที่กระทำกับตัวอย่างพลาสติก

ที่มา: Inada *et al.* (2001: 139-142)

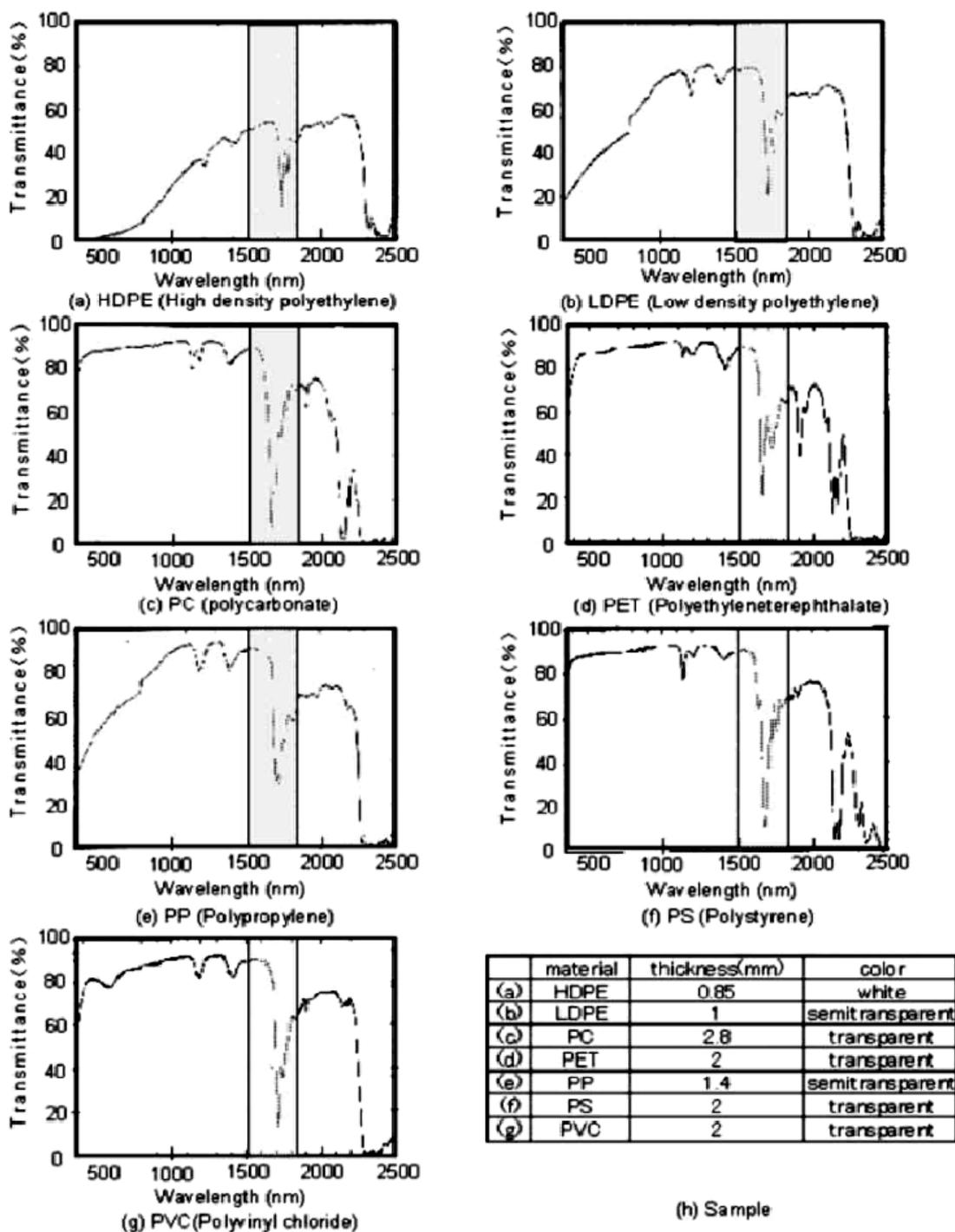
เมื่อเทียบความสัมพันธ์กับตัวอย่างที่ไม่กระเจิงแสงและกำหนดให้อัตราการสะท้อนแสงและอัตราการกระเจิงแสงเป็นไปตามสมการที่ 5 และ 6 ตามลำดับ จะพบว่าค่าการส่งผ่านแสงของพลาสติกที่ทดสอบด้วยระบบวัดอัตราการส่งผ่านแสงจะเป็นไปตามสมการที่ 7 (Inada *et al.*, 2001: 139-142) ตัวอย่างค่าสเปกตรัมของพลาสติกชนิดต่างๆที่ทดสอบด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์แสดงดังภาพที่ 4 (Inada *et al.*, 2001: 133-134)

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (5)$$

$$S = \frac{I_s}{I_0} \quad (6)$$

$$T = e^{-\epsilon dc} - (R + S) \quad (7)$$

เมื่อ R = อัตราการสะท้อนแสง
 S = อัตราการกระเจิงแสง

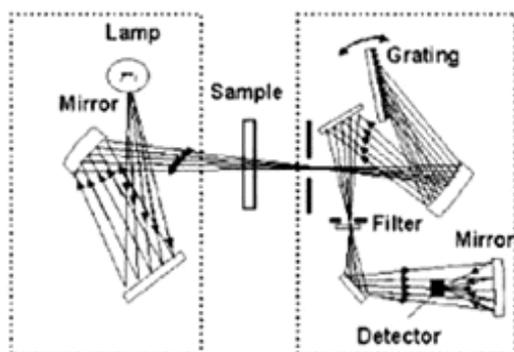


ภาพที่ 4 ค่าสเปกตรัมช่วง 350-2500 nm ของตัวอย่างพลาสติกชนิดต่างๆ

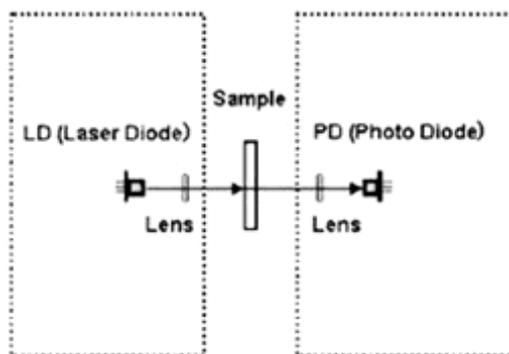
ที่มา: Inada *et al.* (2001: 133-134)

การประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอดแทนการใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์

Inada *et al.* (2001) ได้ทดลองใช้เลเซอร์ไดโอดในการบ่งชี้ชนิดของพลาสติกเปรียบเทียบกับการใช้สเปกโตรมิเตอร์ ดังแสดงการทำงานในภาพที่ 5 จะเห็นว่าระบบการทำงานที่ประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอดจะใช้อุปกรณ์และความซับซ้อนน้อยกว่าเครื่องสเปกโตรมิเตอร์



(ก) การใช้สเปกโตรมิเตอร์



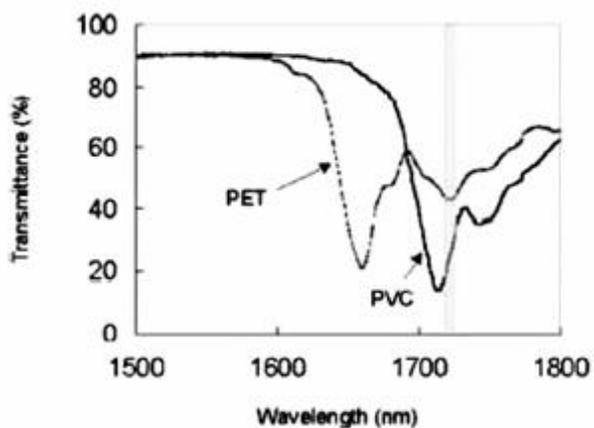
(ข) การประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอด

ภาพที่ 5 เปรียบเทียบการทำงานระหว่าง

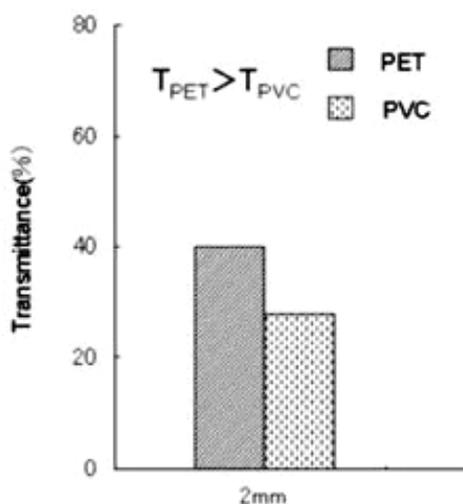
(ก) การใช้สเปกโตรมิเตอร์ และ (ข) การประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอด

ที่มา: Inada *et al.* (2001)

Inada *et al.* (2001) ได้ทดลองบ่งชี้พลาสติกชนิด Polyethylene Terephthalate (PET) และ Polyvinyl Chloride (PVC) จากค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่แตกต่างกันด้วยวิธีที่ใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์และวิธีการประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอดความยาวคลื่น 1722 nm ปรากฏว่าวิธีการประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอดสามารถบ่งชี้ชนิดของพลาสติกได้เช่นเดียวกับการใช้สเปกโตรมิเตอร์ดังภาพที่ 6



(ก) ผลของการใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์



(ข) ผลของการประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่น 1722 nm

ภาพที่ 6 เปรียบเทียบผลการบ่งชี้ชนิดของพลาสติก PET และ PVC ระหว่าง

(ก) ผลของการใช้สเปกโตรมิเตอร์และ

(ข) ผลของการประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่น 1722 nm

ที่มา: Inada *et al.* (2001)

Inada *et al.* (2001) ได้เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการบ่งชี้ชนิดของพลาสติกระหว่างวิธีการใช้สเปกโตรมิเตอร์กับวิธีการประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอดในตารางที่ 1 สรุปได้ว่าวิธีการประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอดมีข้อดีที่ราคาถูก, ขนาดเล็ก, น้ำหนักเบา, การบำรุงรักษาต่ำ, อายุการใช้

งานยาวนาน, ตอบสนองรวดเร็ว และกินไฟน้อย แต่ก็มีข้อเสียด้านความแม่นยำ (Identification accuracy) และให้รายละเอียดในการวิเคราะห์ได้น้อยกว่าวิธีการใช้สเปกโตรมิเตอร์

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการบ่งชี้ชนิดพลาสติกระหว่างวิธีที่ใช้สเปกโตรมิเตอร์กับวิธีที่ประยุกต์ใช้เลเซอร์ไดโอด

Method	(a) Near-infrared spectrometer	(b) LD absorption	(a)/(b) Ratio
Price (\$)	42000-84000	4200	1/10-1/20
Size (mm ³)	400×300×200-1000×1000×500	50×100×100	1/40-1/1000
Weight (kg)	15	0.5	1/30
Maintenance	Required	Free	∞
Lifetime of light source (h)	~ 3000 (incandescent lamp)	~100000 (laser diode)	33
Response speed (ms)	1	0.05	1/20
Dissipation power (W)	200	5	1/40
Identification accuracy	Good	Medium	-
Analysis	Detail	Simple	-

ที่มา: Inada *et al.* (2001)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ในการทำตัวอย่างพลาสติก
 - 1.1 เม็ดพลาสติกบริสุทธิ์ชนิดโพลีโพรพิลีน
 - 1.2 เม็ดพลาสติกกรีไซเคิลชนิดโพลีโพรพิลีน
 - 1.3 สีผสมพลาสติกชนิดผงได้แก่ สีแดง, สีน้ำเงิน และสีเขียว
 - 1.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก
 - 1.5 แม่พิมพ์พลาสติก
 - 1.6 เครื่องฉีดพลาสติก
2. เครื่องทดสอบค่าความทนแรงดึง
3. เครื่องทดสอบค่าความทนแรงกระแทก
4. เครื่องสเปกโตรมิเตอร์
5. อุปกรณ์ในการออกแบบเซนเซอร์
 - 5.1 เลเซอร์ไดโอด
 - 5.2 โฟโตไดโอด
 - 5.3 วงจรส่วนขับเลเซอร์
 - 5.4 วงจรส่วนรับสัญญาณ
 - 5.5 วงจรส่วนประมวลผลและแสดงผล
 - 5.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์
 - 5.7 เครื่องโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์
 - 5.8 มัลติมิเตอร์
 - 5.9 Oscilloscope
 - 5.10 คอมพิวเตอร์
 - 5.11 โปรแกรมคอมพิวเตอร์

วิธีการ

1. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

- 1.1 ศึกษาและเลือกชนิดของพลาสติกรีไซเคิล
- 1.2 ออกแบบและจัดทำชิ้นงานพลาสติกรีไซเคิลที่จะใช้ทดลอง
- 1.3 ทดสอบค่าสมบัติทางกลบางประการ ได้แก่ ค่าความทนแรงดึงและค่าความทนแรงกระแทกของตัวอย่างพลาสติกที่จัดทำขึ้น
- 1.4 ทดลองใช้สเปกโตรมิเตอร์วัดค่าสเปกตรัมของตัวอย่างพลาสติกที่จัดทำขึ้น
- 1.5 นำผลการทดสอบจากสเปกโตรมิเตอร์มาวิเคราะห์เพื่อออกแบบเซนเซอร์
- 1.6 ทดลองสร้างเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์
- 1.7 ทดสอบค่าการส่งผ่านแสงของตัวอย่างพลาสติกที่จัดทำขึ้นด้วยเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น
- 1.8 นำผลการทดสอบค่าการส่งผ่านแสงจากเซนเซอร์มาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์กับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลและค่าสมบัติทางกลบางประการที่ได้ทำการทดสอบ
- 1.9 นำผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงและสมบัติทางกลบางประการมาพัฒนาโปรแกรมในส่วนประมวลผลและแสดงผลของเซนเซอร์
- 1.10 ทดลองใช้เซนเซอร์ตรวจวัดอัตราส่วนผสมรีไซเคิลและค่าสมบัติทางกล ได้แก่ ค่าความทนแรงดึงและค่าความทนแรงกระแทกของตัวอย่างพลาสติกที่ได้จัดทำขึ้น
- 1.11 เปรียบเทียบการทำงานระหว่างเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นกับสเปกโตรมิเตอร์
- 1.12 สรุปผล

2. ตัวอย่างพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง

2.1 การเลือกชนิดของพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง

เนื่องจากพลาสติกที่ใช้งานในปัจจุบันมีหลากหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไปตามประเภทการใช้งาน สำหรับพลาสติกที่สนใจจะพิจารณาคือชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ซึ่งสามารถนำกลับมาหลอมใหม่ได้ การเลือกชนิดของพลาสติกที่ใช้ในการทดลองจะพิจารณาจากปริมาณการใช้งานในอุตสาหกรรมและความเหมาะสมในการใช้พลาสติกรีไซเคิล

2.1.1 พลาสติกบริสุทธิ์ชนิดโพลีโพรพิลีน

เมื่อพิจารณาปริมาณเม็ดพลาสติกที่มีการใช้งานมากที่สุดในประเทศไทยตั้งแต่ปี 2548 ถึง ปี 2550 ในตารางที่ 2 จะเห็นว่าอันดับแรกได้แก่โพลีโพรพิลีน ซึ่งมีปริมาณการใช้งานเพิ่มขึ้นทุกปีและมีการใช้งานมากกว่าชนิดอื่นอย่างน้อยสองเท่า

ตารางที่ 2 ความต้องการใช้เม็ดพลาสติกของไทย

เม็ดพลาสติกที่ใช้	ปริมาณ (ตัน/ปี)		
	ปี 2548	ปี 2549	ปี 2550
Polypropylene	842,000	865,000	963,000
LDPE/LLDPE	527,000	547,000	579,000
HDPE	546,000	559,000	541,000
PVC	494,000	472,000	467,000
GP-HI PS	202,000	185,000	199,000
PET	93,000	100,000	115,000
ABS	102,000	113,000	90,000

ที่มา: แหล่งรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับอุตสาหกรรมพลาสติกของไทยและของสากล (2551)

เม็ดพลาสติกบริสุทธิ์ชนิดโพลีโพรพิลีนเกรดทั่วไปที่ผลิตจากโรงงานและไม่ได้ผสมสารเติมแต่งคุณสมบัติจะถูกแบ่งกลุ่มย่อยตามลักษณะของการนำไปใช้งานดังนี้

1) Random Copolymer เป็นโพลีโพรพิลีนที่มีความใสเป็นคุณสมบัติพิเศษ งานที่ใช้ได้แก่ กล่องบรรจุอาหารทั่วไป

2) Homopolymer เป็นโพลีโพรพิลีนที่มีคุณสมบัติแข็ง ใช้ในงานฉีดขึ้นรูปทั่วไป เช่น ถัง, กะละมัง, ตะกร้า, ของเด็กเล่น และภาชนะบรรจุทั่วไป เม็ดพลาสติกมีลักษณะใสปานกลาง

3) Block Copolymer เป็นโพลีโพรพิลีนที่ใช้ในงานที่ต้องรับแรงกระแทกสูงทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำเช่น ชิ้นส่วนในตู้เย็น, ชิ้นส่วนเครื่องซักผ้า, อุปกรณ์รถยนต์, เฟอ์นเจอร์ และภาชนะบรรจุที่ต้องการรับแรงกระแทกสูง เม็ดพลาสติกมีลักษณะขาวขุ่น

เมื่อพิจารณาประเภทการใช้งานผลิตภัณฑ์โพลีโพรพิลีนจะพบว่า งานที่ใช้ Random Copolymer เป็นงานที่ต้องการความใส ส่วนใหญ่ใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหาร ทำให้ไม่เหมาะสมกับการใช้พลาสติกรีไซเคิล ส่วน Homopolymer จะใช้ในงานทั่วไปที่ไม่ได้เน้นสมบัติทางกลมากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกชนิด Block Copolymer เนื่องจากนิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ที่เป็นชิ้นส่วนสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมเช่น ชิ้นส่วนยานยนต์และชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งสามารถใช้พลาสติกรีไซเคิลได้และต้องการความแน่นอนทางสมบัติเชิงกลในการควบคุมคุณภาพ

2.1.2 พลาสติกรีไซเคิลชนิดโพลีโพรพิลีน

การคัดแยกขยะพลาสติกเพื่อนำไปรีไซเคิลนั้นสามารถบอกได้ว่าขยะชิ้นใดเป็นโพลีโพรพิลีนแต่ไม่สามารถบอกรายละเอียดได้ว่าเป็นโพลีโพรพิลีนประเภทใด จากการสอบถามข้อมูลของพลาสติกรีไซเคิลชนิดโพลีโพรพิลีนจากบริษัท เอส พี เคมีคอลด์ แอนด์ อีควิปเมนต์ จำกัด ซึ่งเป็นโรงงานรีไซเคิลขยะพลาสติกพบว่า พลาสติกรีไซเคิลชนิดโพลีโพรพิลีนจะแบ่งประเภทตามสีของขยะพลาสติกดังตารางที่ 3 พลาสติกรีไซเคิลแต่ละชนิดมีคุณสมบัติต่างกันไป ทั้งสี, สมบัติทางกล และราคา งานวิจัยนี้เลือกใช้พลาสติกรีไซเคิลชนิดโพลีโพรพิลีนแบบใส เพราะสามารถเลือกผสมสีได้ตามความต้องการ

ตารางที่ 3 การแบ่งประเภทของพลาสติกรีไซเคิลชนิดโพลีโพรพิลีน

ชื่อเรียก	สี	สมบัติเชิงกล	ราคา
PP ใส	สีขาว (โปร่งใส)	-	สูงที่สุด
PP ขาว	ขาว	ปานกลาง	สูง
PP สี	สีต่างๆ	ปานกลาง	ปานกลาง
PP ดำเกรด B	ดำ	ปานกลาง	ต่ำ
PP ดำเกรด C	ดำ	ต่ำ	ต่ำที่สุด

หมายเหตุ PP หมายถึง Polypropylene

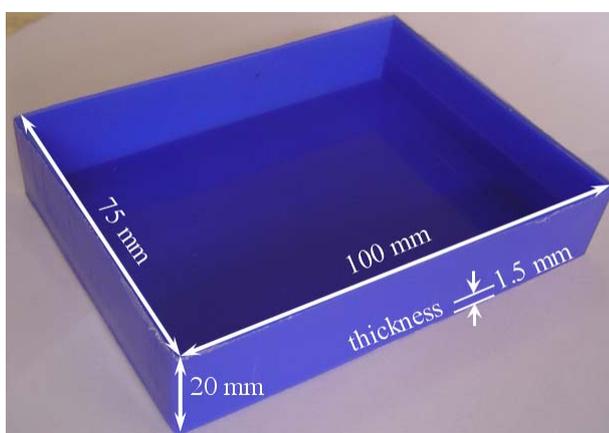
2.2 การออกแบบและจัดทำตัวอย่างพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง

2.2.1 อัตราส่วนผสมระหว่างพลาสติกบริสุทธิ์และพลาสติกรีไซเคิล

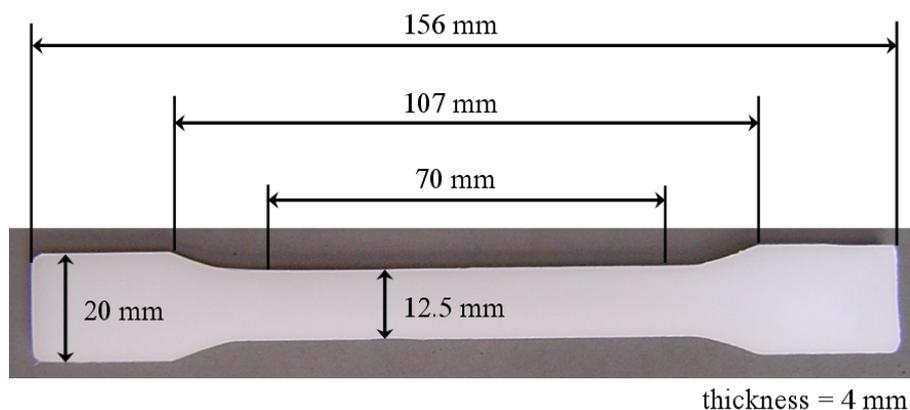
วิธีการวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นการเตรียมตัวอย่างพลาสติกที่ผสมระหว่างพลาสติกบริสุทธิ์และพลาสติกรีไซเคิล โดยใช้เม็ดพลาสติกโพลีโพรพิลีนบริสุทธิ์ชนิด Block Copolymer รหัส 2300SC จากบริษัท IRPC Public Company Limited และเม็ดพลาสติกรีไซเคิลโพลีโพรพิลีนชนิดใสจากโรงงานรีไซเคิลขยะพลาสติก นำมาผสมกันในอัตราส่วนระหว่างพลาสติกรีไซเคิลต่อพลาสติกบริสุทธิ์ด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก โดยเน้นความละเอียดช่วง 0 - 50% เพราะเป็นช่วงอัตราส่วนผสมที่นิยมใช้ในการใช้งานจริง อัตราส่วนผสมดังกล่าวมีด้วยกัน 8 ค่าได้แก่พลาสติกรีไซเคิล 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 75% และ 100%

2.2.2 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่าง

การขึ้นรูปตัวอย่างใช้แม่พิมพ์พลาสติกและเครื่องฉีดพลาสติกของแผนกโพลิเมอร์ สถาบันคีนคัวและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตัวอย่างที่ทำขึ้นจัดทำเป็นสองลักษณะคือ ผลิตภัณฑ์กล่องสำหรับใส่ของแบบไม่มีฝาปิดเพื่อใช้เป็นตัวแทนของผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผสมระหว่างพลาสติกบริสุทธิ์และพลาสติกรีไซเคิลดังภาพที่ 7 และผลิตภัณฑ์รูป Dumbbell เพื่อใช้สำหรับทดสอบสมบัติทางกลดังภาพที่ 8 โดยควบคุมเงื่อนไขของเครื่องฉีดพลาสติกเช่น อุณหภูมิ และแรงดัน ให้มีค่าใกล้เคียงกันทุกชิ้นงาน



ภาพที่ 7 ลักษณะชิ้นงานกล่อง



ภาพที่ 8 ลักษณะชิ้นงาน Dumbbell

2.2.3 สีที่ใช้ในการทดลอง

เนื่องจากผลิตภัณฑ์พลาสติกส่วนใหญ่จะมีสีแตกต่างกัน ดังนั้นสีจึงเป็นตัวแปรที่ถูกนำมาพิจารณาด้วย เพราะมีความเป็นไปได้ที่สีจะมีผลต่อสมบัติทางแสง งานวิจัยนี้จึงเลือกผสมสีที่เป็นแม่สีได้แก่ แดง (Red), น้ำเงิน (Blue), เขียว (Green) และแบบไม่ผสมสี (Natural) สีที่ผสมนั้นมีลักษณะเป็นผงใช้สำหรับคลุกเคล้ากับเม็ดพลาสติกก่อนเข้าเครื่องฉีด ใช้อัตราส่วนผสมจากการชั่งน้ำหนักในอัตราส่วนน้ำหนักสี 10 กรัม ต่อน้ำหนักพลาสติก 1 กิโลกรัมเท่ากันทุกสี โดยผสมเฉพาะตัวอย่างชิ้นงานทดลอง เมื่อรวมกับอัตราส่วนผสมทั้ง 8 แบบจะได้ตัวอย่างทั้งหมดจำนวน 32 ชิ้น โดยใช้ชื่อตัวอย่างดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ชื่อและลักษณะของตัวอย่างของพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อตัวอย่าง	สี	อัตราส่วนผสมพลาสติกกรีไซเทิล (%)
N000	ไม่ผสมสี	0
N010	ไม่ผสมสี	10
N020	ไม่ผสมสี	20
N030	ไม่ผสมสี	30
N040	ไม่ผสมสี	40
N050	ไม่ผสมสี	50

ตารางที่ 4 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	สี	อัตราส่วนผสมพลาสติกกรี ไซเคล (%)
N075	ไม่ผสมสี	75
N100	ไม่ผสมสี	100
B000	น้ำเงิน	0
B010	น้ำเงิน	10
B020	น้ำเงิน	20
B030	น้ำเงิน	30
B040	น้ำเงิน	40
B050	น้ำเงิน	50
B075	น้ำเงิน	75
B100	น้ำเงิน	100
R000	แดง	0
R010	แดง	10
R020	แดง	20
R030	แดง	30
R040	แดง	40
R050	แดง	50
R075	แดง	75
R100	แดง	100
G000	เขียว	0
G010	เขียว	10
G020	เขียว	20
G030	เขียว	30
G040	เขียว	40
G050	เขียว	50
G075	เขียว	75
G100	เขียว	100

3. การทดสอบสมบัติทางกล

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบสมบัติทางกลบางประการของตัวอย่างพลาสติกที่จัดทำขึ้น เพื่อใช้เป็นตัวบ่งบอกถึงความแตกต่างของพลาสติกบริสุทธิ์และพลาสติกรีไซเคิล และเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมรีไซเคิลกับค่าสมบัติทางกลบางประการ

3.1 การทดสอบความทนแรงดึง (Tensile strength)

การทดสอบค่าความทนแรงดึงใช้เครื่อง Universal testing machine ของศูนย์นวัตกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 9 โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D638 ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับการทดสอบค่าความทนแรงดึงของพลาสติก (อัตราเร็วในการดึง 50 mm/min) โดยทดสอบกับชิ้นงานตัวอย่าง Dumbbell จำนวนสามชิ้นต่อหนึ่งอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิล ผลการทดสอบที่ได้เป็นค่าแรงดึงสูงสุดต่อพื้นที่ที่วัสดุสามารถทนได้ก่อนจะเปลี่ยนรูปร่างจากแบบยืดหยุ่นไปเป็นการเปลี่ยนรูปร่างแบบถาวร (จุด yield point) ในหน่วย N/mm^2

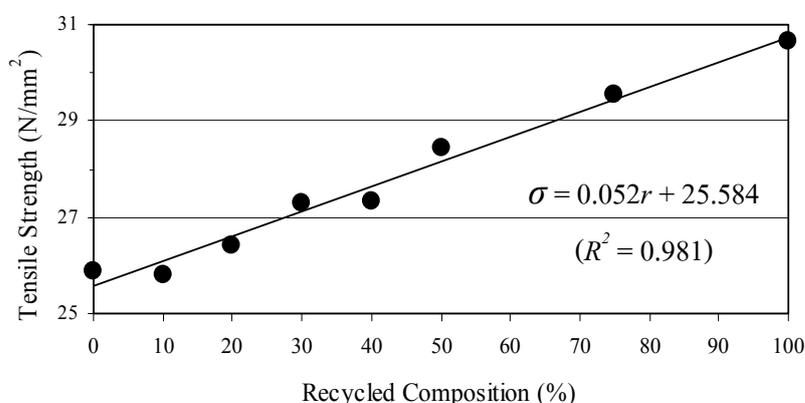


ภาพที่ 9 เครื่อง Universal testing machine ที่ใช้ในการทดสอบค่าความทนแรงดึง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดึงเฉลี่ยกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลของตัวอย่างที่ทดสอบแสดงดังภาพที่ 10 และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นจะได้ดังสมการที่ 8 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination หรือ R^2) เท่ากับ 0.981

$$\sigma = 0.052r + 25.584 \quad (8)$$

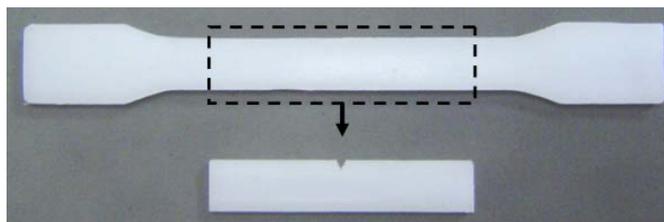
เมื่อ σ = ค่าความทนแรงดึง (N/mm^2)
 r = อัตราส่วนผสมรีไซเคิล (%)



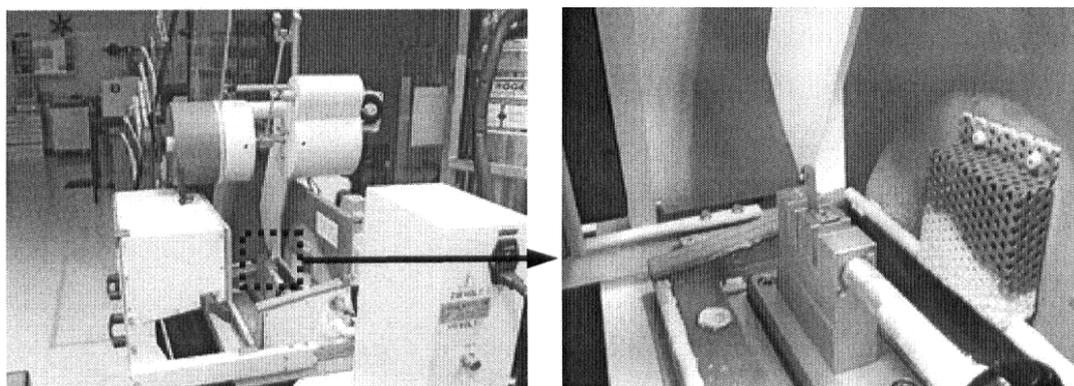
ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดึงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิล

3.2 การทดสอบความทนแรงกระแทก (Impact strength)

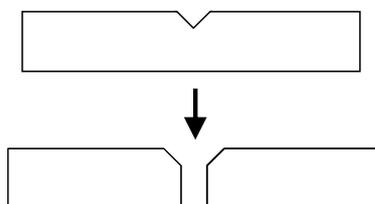
การทดสอบความทนแรงกระแทกในงานวิจัยนี้ได้ส่งตัวอย่าง Dumbbell ที่จัดทำขึ้นไปทดสอบที่ ห้องปฏิบัติการทดสอบสมบัติทางกล ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ โดยเจ้าหน้าที่ผู้ทดสอบได้นำชิ้นงานตัวอย่างมาตัดให้ได้ขนาดประมาณ $12.5 \times 64 \times 3.6 \text{ mm}^3$ และบากเป็นรูปตัววี ดังภาพที่ 11 แล้วทำการทดสอบแบบ I-zod (V-notched) ด้วยเครื่อง Pendulum impact tester (Resil Impactor) with Cryobox ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 12 ที่ความเร็วหัวทดสอบ 3.45 m/s ชิ้นงานทดสอบถูกควบคุมอุณหภูมิ -20°C ก่อนการทดสอบและในขณะที่ทำการทดสอบภายในตู้อบที่ถูกทำให้เย็นด้วยไนโตรเจนเหลว จำนวนห้าชิ้นต่อหนึ่งอัตราส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิล หลังจากการทดสอบชิ้นงานทั้งหมดมีลักษณะแตกหักเป็นสองส่วนดังภาพที่ 13 ผลการทดสอบที่ได้เป็นค่าพลังงานต่อพื้นที่ ที่ทำให้วัสดุแตกหักในหน่วย mJ/mm^2



ภาพที่ 11 การเตรียมชิ้นงานทดสอบความทนแรงกระแทกแบบ I-zod (V-notched)



ภาพที่ 12 เครื่อง Pendulum impact tester ที่ใช้ในการทดสอบค่าความทนแรงกระแทก

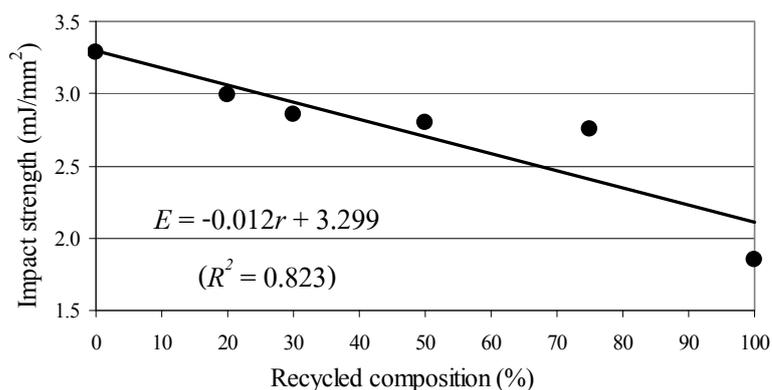


ภาพที่ 13 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานหลังการทดสอบ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงกระแทกเฉลี่ยกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลของตัวอย่างที่ทดสอบแสดงดังภาพที่ 14 และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นจะได้สมการที่ 9 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.823

$$E = -0.012r + 3.299 \quad (9)$$

เมื่อ E = ค่าความทนแรงกระแทก (mJ/mm^2)



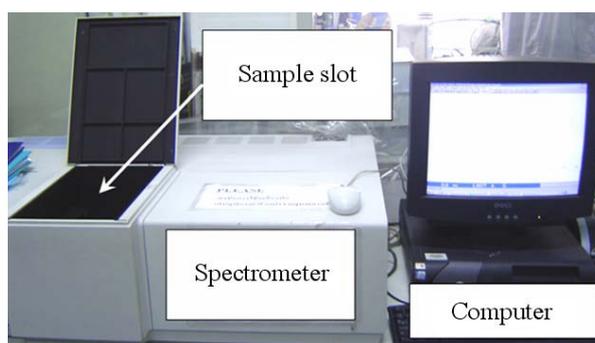
ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงกระแทกกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิล

จากผลการทดสอบค่าความทนแรงดึง (ที่จุด Yield point) ในภาพที่ 10 จะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนผสมรีไซเคิลมากขึ้น ค่าความทนแรงดึงจะเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเมื่อผสมพลาสติกรีไซเคิลค่าดังกล่าวควรจะลดลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะพลาสติกรีไซเคิลที่นำมาใช้ในการทดลองถูกรีไซเคิลมาจากผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีความทนแรงดึงสูงเป็นพิเศษซึ่งมากกว่าพลาสติกบริสุทธิ์ที่ใช้ในการทดลอง แต่จากผลการทดสอบความทนแรงกระแทกในภาพที่ 14 จะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนผสมรีไซเคิลมากขึ้นความทนแรงกระแทกจะลดลง เพราะพลาสติกบริสุทธิ์ที่ใช้เป็น โพลีโพรพิลีนชนิด Block Copolymer ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นด้านการทนแรงกระแทก ดังนั้นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของสมบัติทางกลจึงขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกที่นำมาผสมกัน

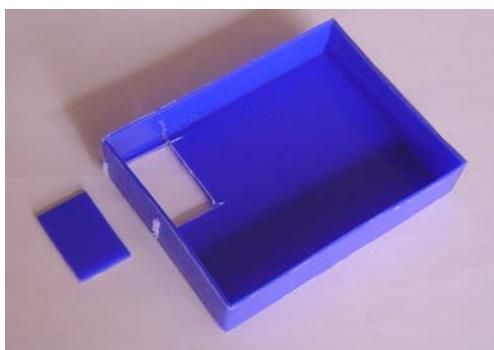
เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนผสมรีไซเคิลกับค่าความทนแรงดึงและค่าความทนแรงกระแทก พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.981 และ 0.823 ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าอัตราส่วนผสมรีไซเคิลมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความทนแรงดึง 98.1% และ 82.3% สำหรับความทนแรงกระแทก ซึ่งค่า R^2 ของความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของค่าความทนแรงกระแทกมีค่าน้อยกว่าความทนแรงดึง ทั้งนี้เป็นเพราะการทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกค่อนข้างจะมีความไม่แน่นอนสูงเนื่องจากขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่น ขนาดของชิ้นงาน, ความกว้างของรอยบาก (V-notched) และความเร็วของหัวทดสอบ เป็นต้น (จินตมัย, 2547) นอกจากนี้จำนวนข้อมูลที่ใช้ทดสอบอาจมีน้อยเกินไปที่จะระบุความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงกระแทกกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลที่แน่นอนได้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้เลือกพิจารณาความสัมพันธ์ที่เป็นแบบเชิงเส้นของอัตราส่วนผสมรีไซเคิลกับค่าสมบัติทางกลที่ได้ทดสอบทั้งสองชนิด โดยมีค่า R^2 มีค่ามากกว่า 0.8

4. การทดสอบค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์

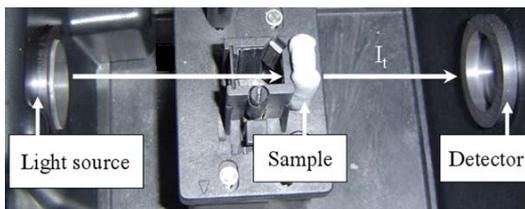
วิธีการวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นการตรวจสอบชิ้นงานพลาสติกที่จัดทำขึ้นโดยการวัดค่าสเปกตรัมด้วยเทคนิค Near infrared spectroscopy ซึ่งเป็นการทดสอบค่าการส่งผ่านแสงช่วงความยาวคลื่น 900-2000 nm โดยใช้สเปกโตรมิเตอร์ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Lambda900 จากห้องปฏิบัติการภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งแสดงผลข้อมูลผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ดังภาพที่ 15 แต่เนื่องจากเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้มีข้อจำกัดเรื่องขนาดของชิ้นงานที่จะทดสอบ ดังนั้นจึงตัดชิ้นงานออกจากบริเวณฐานด้านล่าง โดยตัดบริเวณเดียวกันทุกตัวอย่าง หลังจากตัดแล้วชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดประมาณ $20 \times 30 \times 1.5 \text{ mm}^3$ ดังภาพที่ 16 การวัดทำได้โดยการวางชิ้นงานคั่นระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและตัวตรวจวัดแสงในตัวเครื่อง โดยใช้ดินน้ำมันเป็นตัวยึดจับชิ้นงานกับแท่นวางตัวอย่างดังภาพที่ 17 และตั้งค่าการวัดตั้งแต่ 900-2000 nm โดยการวัดสองครั้งแรกจะเป็นการวัดแบบไม่มีชิ้นงานตัวอย่างเพื่อใช้สำหรับอ้างอิง



ภาพที่ 15 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

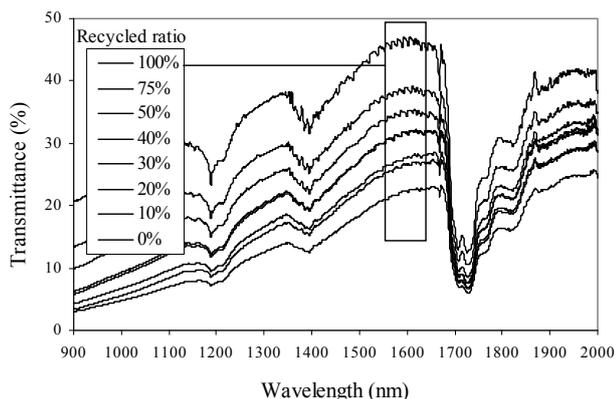


ภาพที่ 16 การตัดชิ้นงานตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

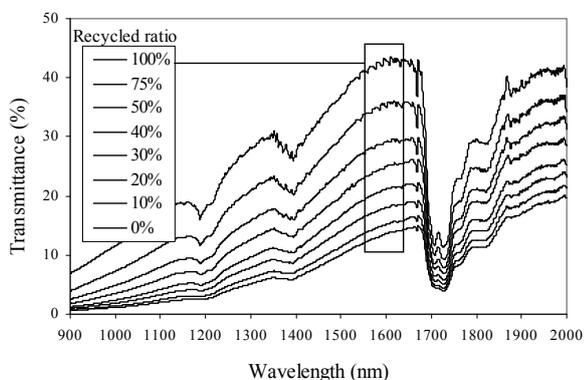


ภาพที่ 17 การวางตัวอย่างในเครื่องสเปกโตรมิเตอร์

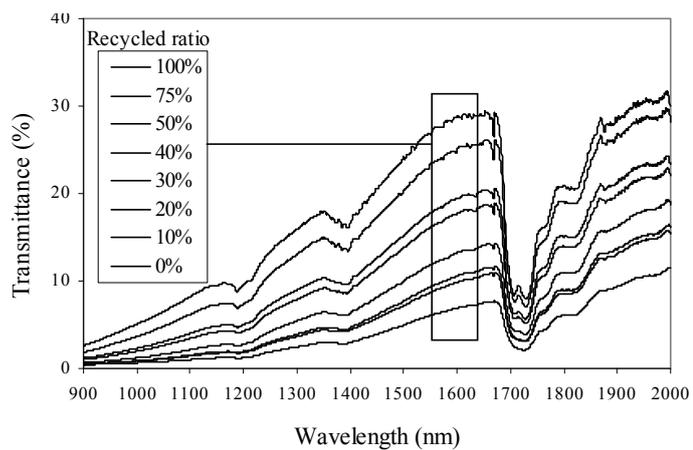
เมื่อนำผลการตรวจวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงเทียบกับคอนโม่มีชิ้นงานมาสร้างกราฟ จะได้ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างทั้ง 32 แบบ โดยแบ่งตามประเภทของตัวอย่างที่มีสีเดียวกันคือ ไม่ผสมสี สีแดง สีนํ้าเงิน และสีเขียว ได้ดังภาพที่ 18 ถึง 21 ตามลำดับ และแบ่งตามประเภทของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมรีไซเคิลเดียวกันคือ 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 75% และ 100% ได้ดังภาพที่ 22 ถึง 29 ตามลำดับ



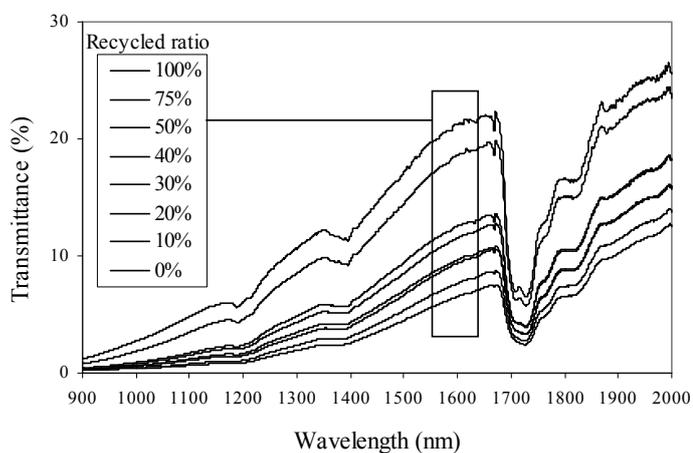
ภาพที่ 18 ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างไม่ผสมสีที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิลต่างๆ



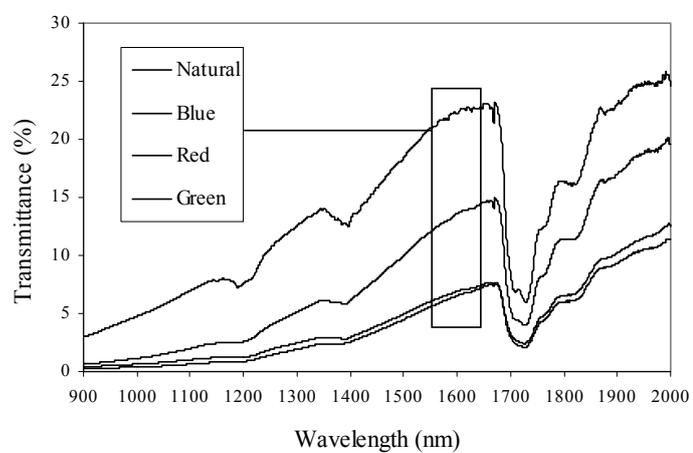
ภาพที่ 19 ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีนํ้าเงินที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิลต่างๆ



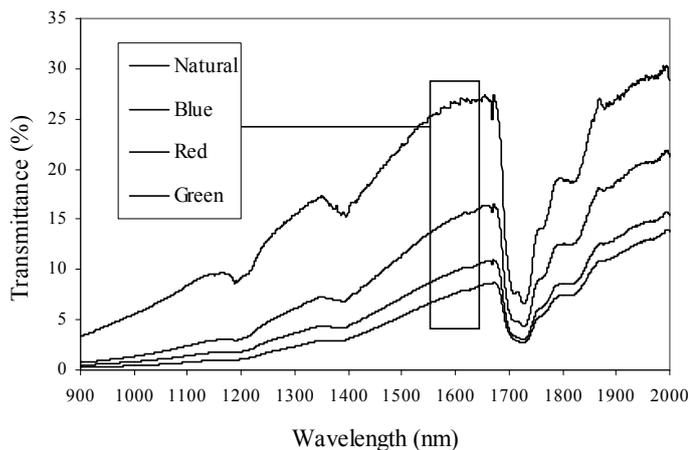
ภาพที่ 20 ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีแดงที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิลต่างๆ



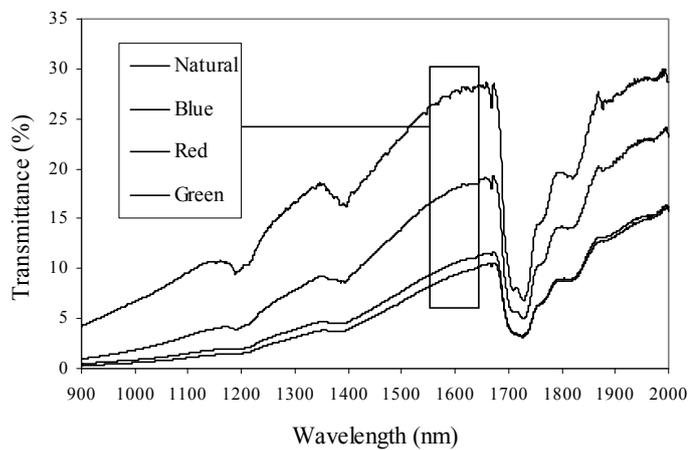
ภาพที่ 21 ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีเขียวที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิลต่างๆ



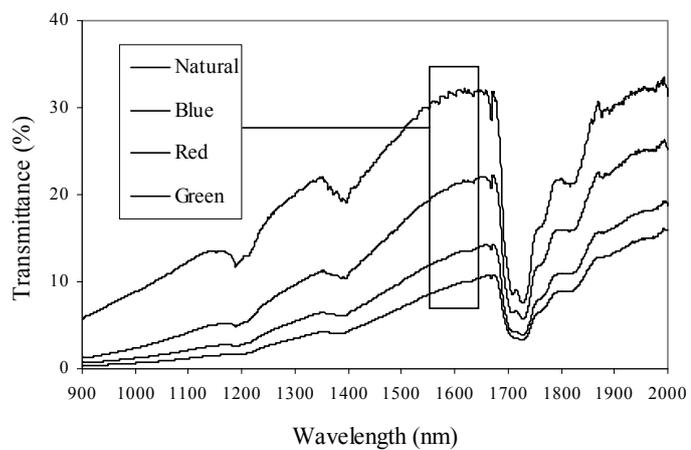
ภาพที่ 22 ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีต่างๆที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิล 0%



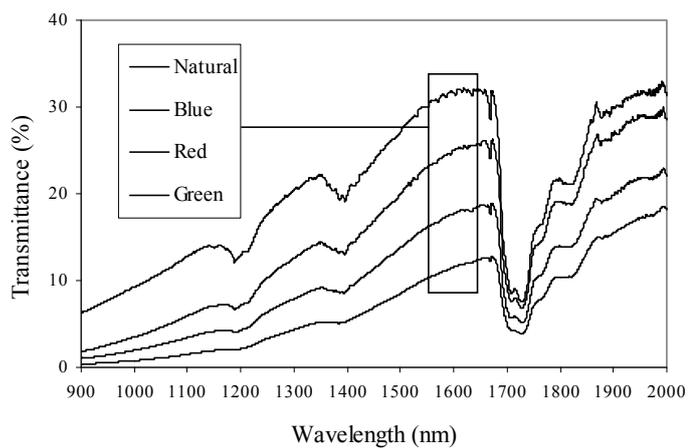
ภาพที่ 23 ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีต่างๆที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิล 10%



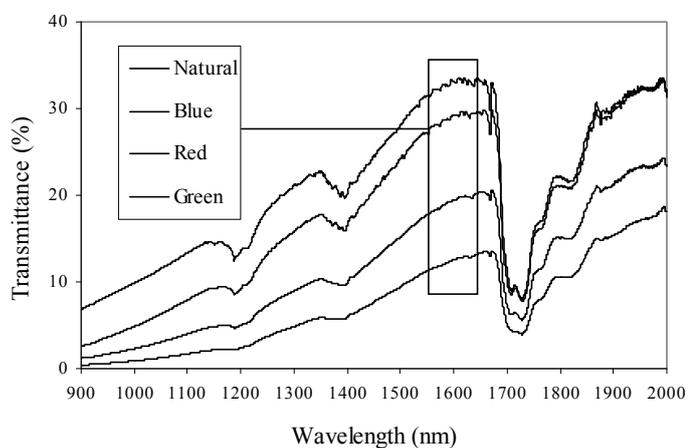
ภาพที่ 24 ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีต่างๆที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิล 20%



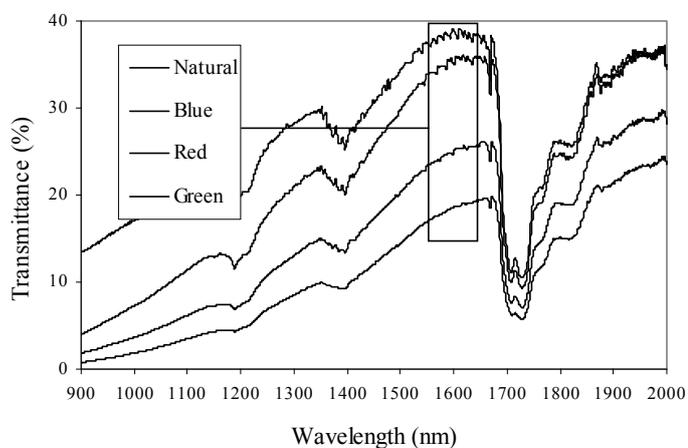
ภาพที่ 25 ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีต่างๆที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิล 30%



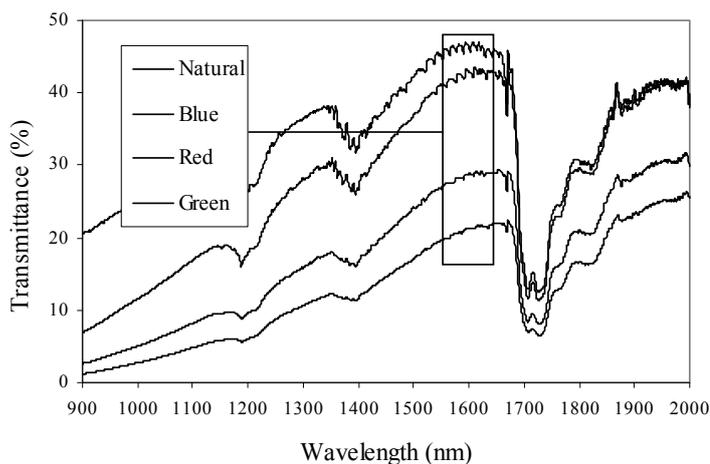
ภาพที่ 26 ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีต่างๆที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิล 40%



ภาพที่ 27 ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีต่างๆที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิล 50%



ภาพที่ 28 ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีต่างๆที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิล 75%



ภาพที่ 29 ค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีต่างๆที่อัตราส่วนผสมรีไซเคิล 100%

เมื่อพิจารณาค่าสเปกตรัมของทุกตัวอย่างพบว่า ลักษณะสเปกตรัมจะคล้ายกันทั้งหมดคือ เมื่อความยาวคลื่นเพิ่มมากขึ้นค่าการส่งผ่านแสงจะเพิ่มมากขึ้น แต่ค่าการส่งผ่านแสงจะตกลงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1200 nm, 1400 nm, และ 1720 nm ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของพลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีนที่ดูดกลืนพลังงานแสงช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวไว้

เมื่อพิจารณาค่าสเปกตรัมของตัวอย่างที่มีสีเดียวกันแต่อัตราส่วนผสมรีไซเคิลต่างกัน ในภาพที่ 18 ถึง 21 พบว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมรีไซเคิลมากจะมีค่าการส่งผ่านแสงมากกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมรีไซเคิลน้อย อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของค่าส่งผ่านแสงของแต่ละตัวอย่างจะไม่เท่ากันทุกความยาวคลื่น ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1550 -1650 nm จะมีความแตกต่างของค่าส่งผ่านแสงชัดเจนที่สุด

เมื่อพิจารณาค่าสเปกตรัมของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมรีไซเคิลเดียวกันแต่มีสีต่างกัน ในภาพที่ 22 ถึง 29 พบว่าตัวอย่างที่มีค่าการส่งผ่านแสงมากที่สุดมีลำดับดังนี้ ตัวอย่างที่ไม่ผสมสี (Natural), ตัวอย่างสีน้ำเงิน (Blue), ตัวอย่างสีแดง (Red) และตัวอย่างสีเขียว (Green)

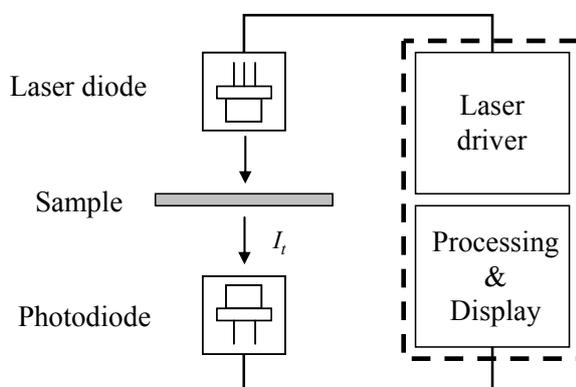
จากสมการการส่งผ่านแสงของตัวอย่างพลาสติกในสมการที่ 7 จะเห็นว่านอกจากความเข้มข้นและความหนาของตัวอย่างแล้ว อัตราการส่งผ่านแสงยังขึ้นกับอัตราการสะท้อนแสงและกระเจิงแสงด้วย ดังนั้นผลของอัตราส่วนผสมรีไซเคิลและสีที่ต่างกัน จะส่งผลให้ค่าของตัวแปรเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไป การที่ค่าส่งผ่านแสงของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมรีไซเคิลนั้น ส่วนหนึ่งเป็นเพราะพลาสติกกรีไซเคิลที่ใช้มีลักษณะ โปร่งใสมากกว่าพลาสติกบริสุทธิ์ที่มีลักษณะขาวขุ่น

5. เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์

5.1 หลักการทำงานของเซนเซอร์

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบเซนเซอร์เพื่อใช้แทนเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ในการตรวจวัดอัตราการส่งผ่านแสงเพื่อหาความแตกต่างของตัวอย่างพลาสติกกรีไซเคิลที่สร้างขึ้น เมื่อพิจารณาผลการทดสอบค่าสเปกตรัมของตัวอย่างที่มีสีเดียวกันในภาพที่ 18 ถึง 21 พบว่าช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1550 – 1650 nm มีความแตกต่างของค่าการส่งผ่านแสงของแต่ละอัตราส่วนผสมกรีไซเคิลชัดเจนที่สุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกเลเซอร์ไดโอดความยาวคลื่น 1550 nm เป็นแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่นเดียว เพราะเลเซอร์ไดโอดความยาวคลื่นดังกล่าวมีใช้งานในการสื่อสารทางแสง มีการผลิตจำหน่ายเชิงพาณิชย์จำนวนมาก ทำให้ราคาถูกลง และสามารถหาได้ทั่วไป โดยใช้เลเซอร์ไดโอดยี่ห้อ Mitsubishi เบอร์ ML925B45F ซึ่งเป็นเลเซอร์ไดโอดชนิด InGaAsP ที่มีโฟโตไดโอดภายในสำหรับสัญญาณป้อนกลับ ให้กำลังแสงเลเซอร์เอาต์พุตแบบต่อเนื่องที่ 5 mW ส่วนภาครับแสงที่ส่งผ่านจากชิ้นงานพลาสติก เลือกใช้โฟโตไดโอดยี่ห้อ Thorlabs เบอร์ FDG03 ซึ่งเป็นโฟโตไดโอดชนิด Ge ที่มีค่าการตอบสนอง (Responsivity) แสงความยาวคลื่น 1550 nm เท่ากับ 1.19 A/W และเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่รับแสง 3 mm

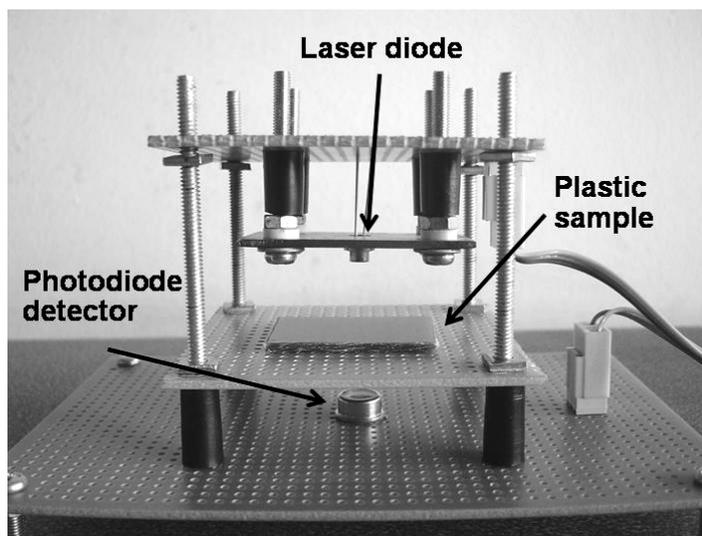
ระบบการทำงานของเซนเซอร์แสดงดังภาพที่ 30 เลเซอร์ไดโอดทำหน้าที่กำเนิดแสงเลเซอร์เพื่อส่งไปยังตัวอย่างพลาสติก จากนั้นโฟโตไดโอดซึ่งอยู่อีกด้านหนึ่งจะตรวจวัดความเข้มแสงที่สามารถผ่านมาได้ (I_t) หลังจากนั้นส่วนประมวลผลจะนำค่าที่ได้มาเทียบกับความเข้มแสงที่วัดได้ขณะไม่มีตัวอย่าง และแสดงผลการตรวจวัดคุณลักษณะพลาสติกทางจอ LCD



ภาพที่ 30 ระบบการทำงานของเซนเซอร์

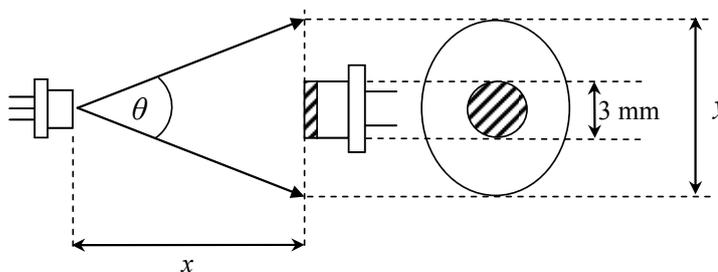
5.2 การติดตั้งเซนเซอร์

การติดตั้งเซนเซอร์มีลักษณะตามภาพที่ 31 เลเซอร์ไดโอดที่อยู่ด้านบนจะส่งแสงเลเซอร์มายังโฟโตไดโอดด้านล่าง โดยมีฐานสำหรับวางตัวอย่างกึ่งกลางซึ่งได้เจาะรูในบริเวณที่ลำแสงเลเซอร์ผ่าน การทดสอบทำได้โดยนำชิ้นงานพลาสติกวางบนฐานดังกล่าว



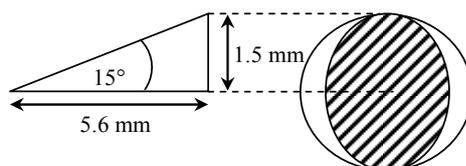
ภาพที่ 31 การติดตั้งเซนเซอร์

เนื่องจากการบานออกของลำแสงเลเซอร์ทำให้ระยะห่างระหว่างเลเซอร์ไดโอดและโฟโตไดโอดมีผลต่อค่าความเข้มแสงที่ตรวจวัดได้ ดังภาพที่ 32 ความเข้มแสงที่โฟโตไดโอดตรวจวัดได้จะอยู่บริเวณพื้นที่รับแสงบริเวณที่แรเงาเท่านั้น การบานออกของลำแสงเลเซอร์ทำให้แสงกระจายออกเป็นรูปวงรี โดยการกระจายออกของความเข้มแสงจะไม่เท่ากันทุกพื้นที่ บริเวณกึ่งกลางของลำแสงจะมีความเข้มแสงมากที่สุด (คูสิต, 2542: 85)



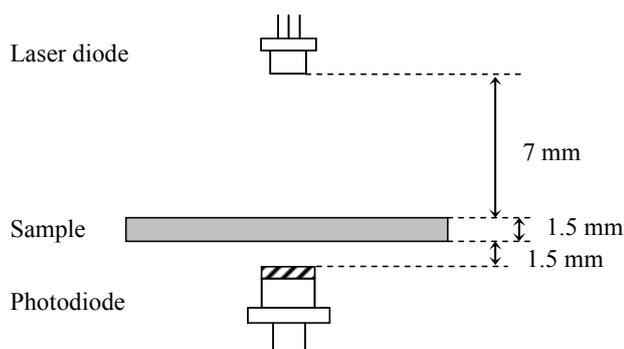
ภาพที่ 32 การบานออกของลำแสงเลเซอร์กับความเข้มแสงที่โฟโตไดโอดตรวจวัดได้

จากภาพที่ 32 จะเห็นว่าการสูญเสียกำลังแสงขึ้นอยู่กับระยะระหว่างเลเซอร์ไดโอดกับโฟโตไดโอด (x) เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียกำลังแสงค่า x ควรจะมีค่าน้อย โดยสามารถคำนวณค่า x ที่ไม่ทำให้เกิดการสูญเสียจากการกำหนดให้พื้นที่ของการกระจายแสงอยู่ภายในพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดทั้งหมด โดยให้ความกว้างของลำแสง (y) มีค่าเท่ากับ 3 mm และจากข้อมูลคุณสมบัติของเลเซอร์ไดโอดพบว่า มุมที่บานออกจนทำให้เกิดการกระจายแสงเป็นรูปวงรีมีสองค่าคือ 25 และ 30 องศา ดังนั้นเมื่อใช้มุมใหญ่ในการคำนวณจะได้ค่า x เท่ากับ 5.6 mm ดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 การคำนวณระยะห่างที่ทำให้โฟโตไดโอดสามารถตรวจวัดแสงได้ทั้งหมด

จากภาพที่ 33 ระยะห่างระหว่างเลเซอร์ไดโอดกับโฟโตไดโอดที่คำนวณได้ในภาคปฏิบัติมีค่าน้อยมากเพียง 5.6 mm ทำให้ไม่สะดวกในการวางชิ้นงานที่จะทดสอบ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในทางปฏิบัติงานวิจัยนี้จึงออกแบบให้ระยะห่างระหว่างเลเซอร์ไดโอดกับฐานวางตัวอย่างมีค่าประมาณ 8.5 mm หลังจากวางตัวอย่างพลาสติกแล้วระยะห่างจะเป็นไปตามภาพที่ 34

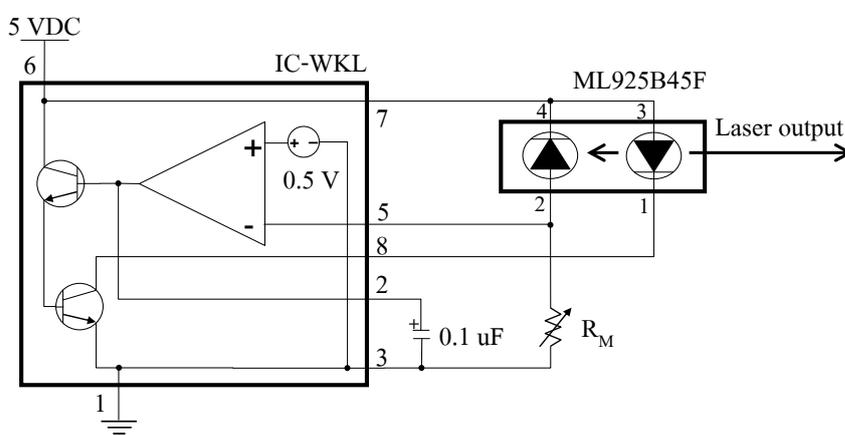


ภาพที่ 34 ระยะห่างในการติดตั้งเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้จะมีการสูญเสียกำลังแสงบางส่วนจากระยะห่างของการติดตั้งเซนเซอร์ แต่ความเข้มแสงที่สามารถตรวจวัดได้ยังมีค่ามากพอที่จะใช้ในการทดลอง อีกทั้งงานวิจัยนี้ใช้วิธีวัดค่าการส่งผ่านแสงของตัวอย่างพลาสติกเทียบกับขณะไม่มีตัวอย่าง ดังนั้นการสูญเสียกำลังแสงจากการบานออกของลำแสงเลเซอร์จึงไม่ส่งผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง

5.3 วงจรขับแสงเลเซอร์

งานวิจัยนี้ใช้การตรวจวัดค่าการส่งผ่านแสงเป็นหลักในการวิเคราะห์หาความแตกต่างของตัวอย่าง ดังนั้นกำลังแสงเอาต์พุตของเลเซอร์ต้องมีความคงที่และสม่ำเสมอ จึงจะทำให้เซนเซอร์ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ IC สำเร็จรูปในการขับเลเซอร์ไดโอดแบบส่งแสงต่อเนื่องยี่ห้อ IC-Haus เบอร์ WKL ซึ่งจะทำงานในโหมดกระแส โดยสามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 90 mA เป็นปริมาณมากพอในการขับเลเซอร์ไดโอดเบอร์ ML925B45F และจ่ายแรงดันคงที่ Forward bias ให้กับเลเซอร์ไดโอดเท่ากับ 1.1 V ซึ่งตรงกับแรงดันในสถานะปกติของเลเซอร์ไดโอดที่ใช้ จึงสามารถต่อเข้ากันได้โดยตรง โดยการต่อวงจรเป็นไปดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 การต่อเลเซอร์ไดโอดกับวงจรขับ

การควบคุมกำลังแสงเอาต์พุตทำได้โดยนำสัญญาณป้อนกลับจากโฟโตไดโอดที่อยู่ภายในตัวถังของเลเซอร์ไดโอดมาเปรียบเทียบกับค่าแรงดันคงที่ 0.5 V ภายใน Differential Amplifier เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังเอาต์พุตของแสงเลเซอร์ สัญญาณป้อนกลับจากโฟโตไดโอดจะมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ค่าแรงดันที่ขา 5 ของ IC แตกต่างจากแรงดันคงที่ 0.5 V ดังนั้นค่ากระแสที่ป้อนให้กับเลเซอร์ไดโอดจึงถูกปรับเปลี่ยนจนกระทั่งค่าสัญญาณป้อนกลับมีค่าเท่ากับสัญญาณอ้างอิงอีกครั้ง สำหรับ Capacitor 0.1 μ F มีหน้าที่หน่วงเวลาในการเริ่มและหยุดจ่ายแรงดันของไฟเลี้ยงเพื่อป้องกันกระแสกระชาก (Transient) ซึ่งจากข้อมูลใน Datasheet กำลังเอาต์พุตของเลเซอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดไม่เกิน 1 % เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ไฟเลี้ยง และกระแสไหลด ซึ่งการกำหนดค่ากำลังแสงเอาต์พุตทำได้โดยปรับค่าตัวต้านทาน R_M ดังสมการที่

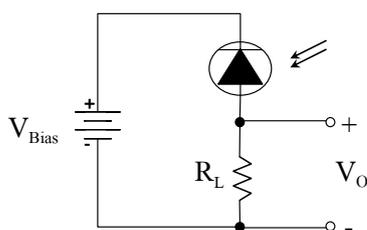
$$R_M = \frac{0.5}{I_M} \times \frac{P_N}{P_S} \quad (10)$$

เมื่อ I_M = กระแสป้อนกลับของโฟโตไดโอดขณะกำลังแสงเลเซอร์ปกติ
 P_N = กำลังแสงเลเซอร์ปกติ
 P_S = กำลังแสงเลเซอร์ที่ต้องการ

จากข้อมูลใน Datasheet ของเลเซอร์ไดโอดจะได้ค่า $I_M = 0.5$ mA และ $P_N = 5$ mW สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดให้กำลังแสงเอาต์พุต (P_S) = 5 mW ซึ่งเป็นค่าปกติในการทำงานของเลเซอร์ ดังนั้นเมื่อคำนวณด้วยสมการที่ 10 จะได้ค่า $R_M = 1$ k Ω

5.4 วงจรตรวจวัดความเข้มแสง

วงจรที่ใช้ต่อกับโฟโตไดโอดเพื่อตรวจวัดแสงเลเซอร์ใช้การต่อแบบ Photoconductive ซึ่งจะให้แรงดัน Reverse bias กับโฟโตไดโอดดังภาพที่ 36 การต่อวงจรแบบนี้มีข้อดีคือมีการตอบสนองต่อแสงเป็นแบบเชิงเส้นและรวดเร็ว แต่ก็มีข้อเสียคือเกิดกระแสมืด (Dark current) หรือมีกระแสไหลขณะที่ไม่มีการตกกระทบโฟโตไดโอด ซึ่งค่าแรงดันเอาต์พุต (V_O) จะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงที่ตกกระทบโฟโตไดโอด รวมทั้งค่าแรงดันไบแอส (V_{Bias}) และความต้านทานโหลด (R_L) (Wilson and Hawkes, 1998: 324-328)



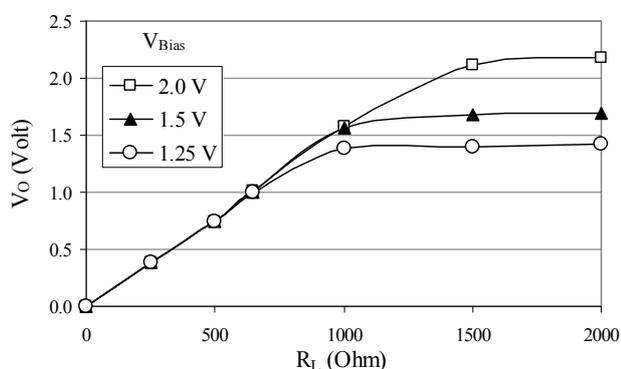
ภาพที่ 36 การต่อโฟโตไดโอดในโหมด Photoconductive

จากการทดลองต่อวงจรตามภาพที่ 36 และติดตั้งเซนเซอร์ตามภาพที่ 34 โดยไม่มีชิ้นงานพลาสติกและไม่มีการส่องแสงจากภายนอกแล้วปรับค่า V_{Bias} และ R_L ที่ค่าต่างๆ จากนั้นวัดค่า V_O ขณะเปิดใช้งานเลเซอร์ไดโอดและขณะปิดใช้งานเลเซอร์ไดโอดจะได้ค่า V_O ดังตารางที่ 5 โดย V_O ที่เกิดขึ้นขณะปิดการใช้งานเลเซอร์ไดโอดจะเกิดจากกระแสมืดที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_L

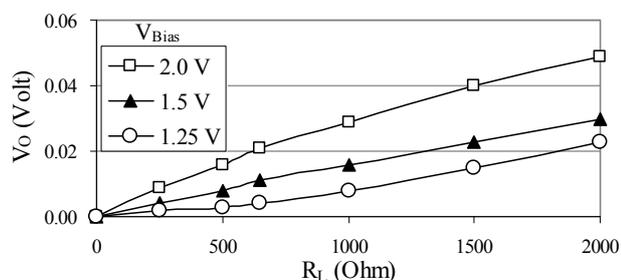
ตารางที่ 5 แรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จากการทดสอบวงจรตรวจวัดความเข้มแสง

R_L (Ohm)	V_O ที่เกิดจากแสงเลเซอร์ (V)			V_O ที่เกิดจากกระแสมืด (V)		
	$V_{Bias} = 1.25$ V	$V_{Bias} = 1.5$ V	$V_{Bias} = 2.0$ V	$V_{Bias} = 1.25$ V	$V_{Bias} = 1.5$ V	$V_{Bias} = 2.0$ V
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
250	0.387	0.380	0.381	0.002	0.004	0.009
500	0.747	0.745	0.747	0.003	0.008	0.016
650	1.000	1.002	1.017	0.004	0.011	0.021
1000	1.380	1.565	1.575	0.008	0.016	0.029
1500	1.400	1.684	2.114	0.015	0.023	0.040
2000	1.420	1.690	2.183	0.023	0.030	0.049

จากตารางที่ 5 เมื่อนำข้อมูลการทดลองค่า V_O ที่เกิดจากแสงเลเซอร์และที่เกิดจากกระแสมืดมาหาความสัมพันธ์ระหว่าง V_O กับ R_L และ V_{Bias} จะได้ดังภาพที่ 37 และ 38 ตามลำดับ



ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_O กับ R_L และ V_{Bias} ที่เกิดจากแสงเลเซอร์



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_O กับ R_L และ V_{Bias} ที่เกิดจากกระแสมืด

จากภาพที่ 37 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของ V_o กับ R_L ของแต่ละ V_{Bias} จะพบว่าค่า V_o จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า R_L เพิ่มมากขึ้น โดยมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นตั้งแต่ V_o เท่ากับศูนย์ จนถึงค่าที่ V_o เท่ากับ V_{Bias} เท่านั้น หลังจากนั้นค่า V_o จะเริ่มคงที่แม้ว่าค่า R_L จะเพิ่มขึ้นก็ตาม จากภาพที่ 38 ค่า V_o ที่เกิดจากกระแสมีดกับ R_L ในช่วง 0 ถึง 2000 k Ω มีลักษณะเป็นเชิงเส้น และค่ากระแสมีดจะแปรผันตรงกับค่า V_{Bias} และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนเฉลี่ยของค่า V_o ที่เกิดจากกระแสมีดเทียบกับ V_o ที่เกิดจากแสงเลเซอร์ในหน่วยเปอร์เซ็นต์เฉพาะช่วงที่ V_o ที่เกิดจากแสงเลเซอร์ยังมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับ R_L จะได้ตารางที่ 6 ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้ V_o มีค่า 1.0 V ดังนั้นจึงใช้ค่า R_L เท่ากับ 650 Ω และใช้ V_{Bias} เท่ากับ 1.25 V เพราะมีกระแสมีดเพียงเล็กน้อย

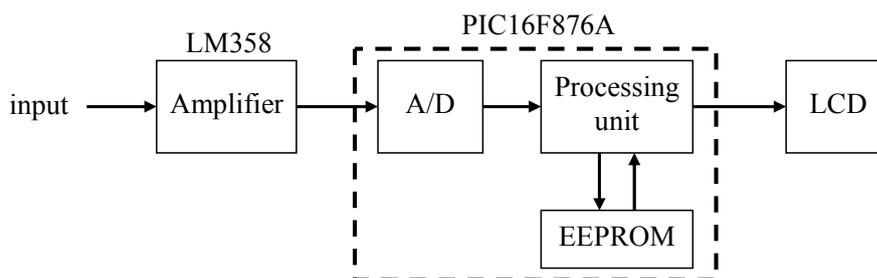
ตารางที่ 6 อัตราส่วนเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุต (V_o) ที่เกิดจากกระแสมีดเทียบกับแสงเลเซอร์

V_{Bias} (V)	อัตราส่วน V_o ที่เกิดจากกระแสมีดเทียบกับแสงเลเซอร์ (%)
1.25	0.40
1.5	1.07
2.0	2.10

5.5 ส่วนประมวลผลและส่วนแสดงผล

5.5.1 หลักการทำงาน

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้เซนเซอร์แสดงผลการตรวจวัดในหน่วยเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงด้วย Liquid Crystal Display (LCD) โดยใช้การเทียบอัตราส่วนระหว่างค่าการส่งผ่านแสงของตัวอย่างพลาสติกที่วัดได้ขณะนั้นกับความเข้มแสงที่วัดได้ขณะไม่มีตัวอย่าง โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC16F876A ในการประมวลผล ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีหน่วยแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (A/D) และหน่วยความจำแบบ EEPROM สำเร็จรูปภายในตัว โดยมีขั้นตอนการทำงานดังภาพที่ 39 สัญญาณอินพุตจากวงจรตรวจวัดความเข้มแสงจะถูกขยายด้วย Op-Amp เบอร์ LM358 ให้อยู่ในช่วง 0-5 V ก่อนจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลและส่งไปประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งไปยังจอ LCD เพื่อแสดงผล



ภาพที่ 39 แผนภาพการทำงานในส่วนประมวลผลและแสดงผล

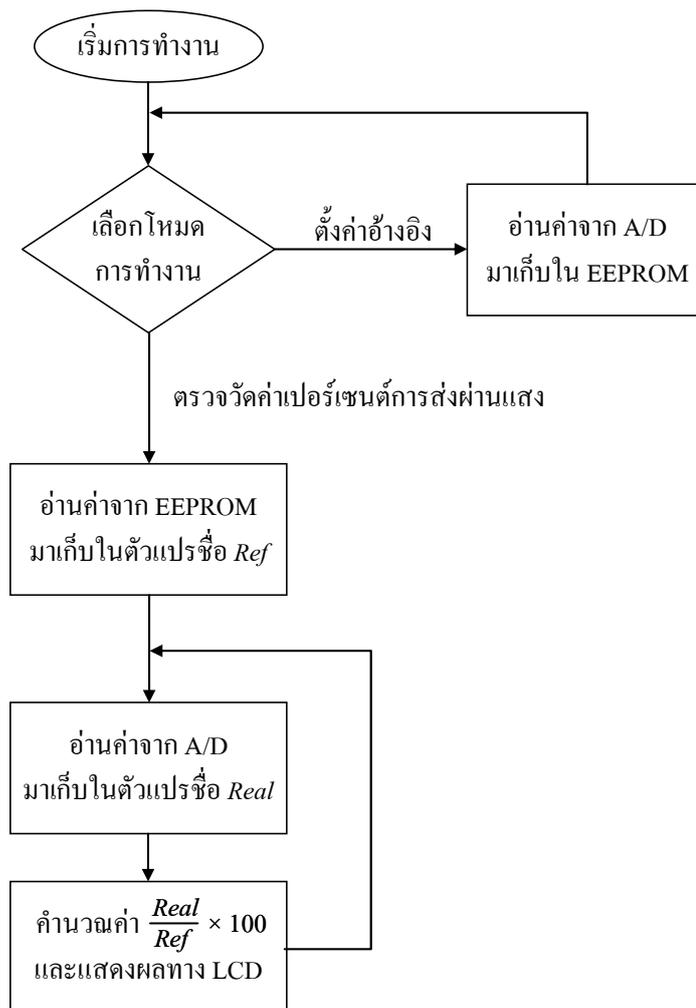
5.5.2 การเขียนโปรแกรมให้ส่วนประมวลผล

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมภาษา C ควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ในการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของชิ้นงานพลาสติกและการแสดงผลทาง LCD โดยแผนภาพการทำงานของโปรแกรมแสดงดังภาพที่ 40

เมื่อเริ่มต้นใช้งานเซนเซอร์ โปรแกรมจะตรวจสอบเงื่อนไขของผู้ใช้จากการกดสวิตซ์ว่าต้องการใช้งานในโหมดใดระหว่างการตั้งค่าอ้างอิง (ค่าที่ทดสอบขณะไม่มีตัวอย่าง) หรือทำการตรวจวัดเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวอย่าง

หากผู้ใช้เลือกโหมดตั้งค่าอ้างอิง คอนโทรลเลอร์จะส่งให้ส่วน A/D อ่านค่าสัญญาณอินพุตในขณะนั้นซึ่งเป็นค่าการทดสอบ โดยไม่มีตัวอย่างพลาสติกแล้วบันทึกลงในหน่วยความจำ EEPROM หลังจากนั้นจะกลับไปตรวจสอบเงื่อนไขจากผู้ใช้อีกครั้ง ซึ่งค่าที่บันทึกในหน่วยความจำ EEPROM นี้จะยังคงอยู่แม้ว่าไม่มีไฟเลี้ยงก็ตาม ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนค่าอ้างอิงได้ตลอดเวลาโดยไม่ต้องเขียนโปรแกรมใหม่

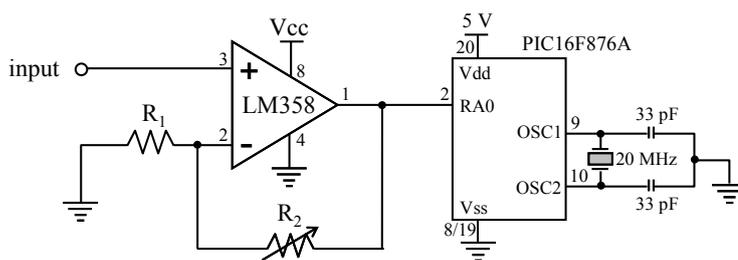
หากผู้ใช้เลือกโหมดตรวจวัดเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง คอนโทรลเลอร์จะอ่านค่าจาก EEPROM มาเก็บไว้ในตัวแปรชื่อ *Ref* จากนั้นจะส่งให้ส่วน A/D อ่านค่าสัญญาณอินพุตในขณะนั้นซึ่งเป็นค่าการทดสอบของตัวอย่างพลาสติกมาเก็บไว้ในตัวแปรชื่อ *Real* จากนั้นนำค่าในตัวแปร *Real* หาค่าในตัวแปร *Ref* แล้วคูณด้วย 100 ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงระหว่างค่าการส่งผ่านแสงของตัวอย่างพลาสติกเทียบกับค่าที่วัดได้ขณะไม่มีตัวอย่าง จากนั้นจะส่งค่าผลลัพธ์ไปแสดงผลยัง LCD และวนตรวจสอบการรับค่าจาก A/D อีกครั้ง



ภาพที่ 40 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมในส่วนประมวลผล

5.5.3 วงจรขยายสัญญาณและความละเอียดในการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล

เนื่องจาก A/D ใน PIC16F876A มีขนาด 10 บิต ดังนั้นความละเอียดในการแปลงสัญญาณจะเท่ากับแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) หารด้วย 2^{10} ซึ่งโดยปกติแล้วถ้าไม่กำหนดค่า V_{ref} จะเท่ากับแรงดันไฟเลี้ยงคือ 5 V แต่เนื่องจากค่าแรงดันมากที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้จากวงจรตรวจวัดความเข้มแสงมีค่าเพียง 1 V ซึ่งมีค่าน้อยกว่า V_{ref} ถึง 5 เท่า ทำให้ความละเอียดในการแปลงสัญญาณมีค่าน้อย ดังนั้นเพื่อให้ได้ความละเอียดในการแปลงสัญญาณมากที่สุดและเพื่อความสะดวกในการปรับแต่งวงจร งานวิจัยนี้ได้ใช้ Op-Amp เบอร์ LM358 ในการขยายสัญญาณอินพุตจากวงจรตรวจวัดความเข้มแสงให้อยู่ในช่วง 0-5 V โดยเชื่อมต่อสัญญาณเอาต์พุตของ Op-Amp กับพอร์ต์ RA0 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 การต่อวงจรขยายสัญญาณกับไมโครคอนโทรลเลอร์

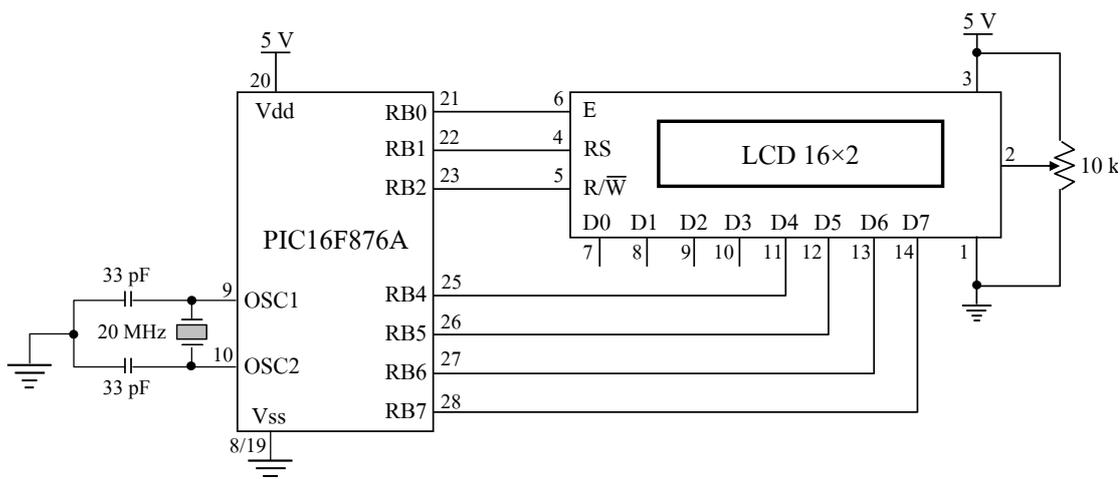
จากภาพที่ 41 ในส่วนของวงจขยายเป็นการขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส อัตราการขยายสัญญาณ (A_V) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 11 เนื่องจากสัญญาณอินพุตจากวงจรตรวจวัดความเข้มแสงซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 V และต้องการขยายสัญญาณให้ได้ขนาด 5 V ดังนั้น อัตราการขยายจึงเท่ากับ 5 เท่า เมื่อกำหนดให้ R_1 มีค่าเท่ากับ 10 k Ω ดังนั้นเมื่อใช้สมการที่ 11 คำนวณจะได้ค่า R_2 เท่ากับ 40 k Ω

$$A_V = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (11)$$

ลักษณะเฉพาะของ Op-Amp เบอร์ LM358 คือมีค่าเอาต์พุตสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ (Saturation) ต่ำกว่าไฟเลี้ยงอยู่ 1.5 V ดังนั้นจึงออกแบบให้ไฟเลี้ยง Op-Amp เท่ากับ 6.5 V ซึ่งทำให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่ขยายแล้วมีค่าไม่เกิน 5 V เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายกับตัว A/D เพราะไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับแรงดันสัญญาณอนาล็อกสูงสุดไม่เกิน 5 V ความละเอียดในการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลจะเท่ากับ 5/1024 ดังนั้นเมื่อสัญญาณอนาล็อกมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่ากับ 4.88 mV จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณดิจิตอลขึ้นหนึ่งขั้น

5.5.4 การเชื่อมต่อกับ LCD

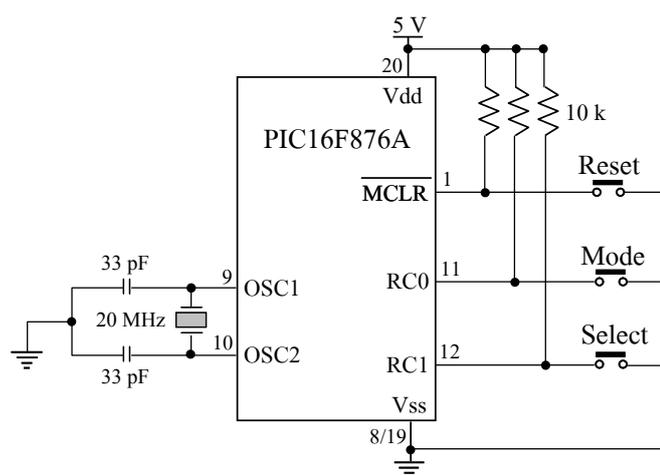
งานวิจัยนี้ใช้ LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด ซึ่งเป็น LCD ชนิดสำเร็จรูปที่สามารถต่อเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้โดยตรง โดยใช้โหมดการทำงานแบบ 4 บิตซึ่งจะใช้ขาสัญญาณในการรับส่งข้อมูลจำนวน 4 เส้น และขาสัญญาณควบคุม 3 ขา เชื่อมต่อกับพอร์ต B ของไมโครคอนโทรลเลอร์ดังภาพที่ 42 สำหรับความเข้มของจอภาพขึ้นอยู่กับค่าแรงดันจากตัวต้านทานที่ขา 2 ของ LCD



ภาพที่ 42 การต่อ LCD กับไมโครคอนโทรลเลอร์

5.5.5 การต่อสวิตช์เพื่อควบคุมการทำงานของคอนโทรลเลอร์

เนื่องจากการทำงานของเซนเซอร์ต้องตรวจสอบเงื่อนไขจากผู้ใช้งานที่ต้องการให้เซนเซอร์ทำงานในโหมดใดระหว่างการทำงานค้างหรือตรวจวัดเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงกำหนดการใช้งานสวิตช์สำหรับการตัดสินใจของผู้ใช้ไว้สามประเภทคือสวิตช์สำหรับเปลี่ยนโหมด (Mode), สวิตช์สำหรับเลือก (Select) และสวิตช์สำหรับรีเซ็ต (Reset) ซึ่งเป็นสวิตช์ชนิดกดติดปล่อยดับโดยมีรูปแบบการต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ดังภาพที่ 43



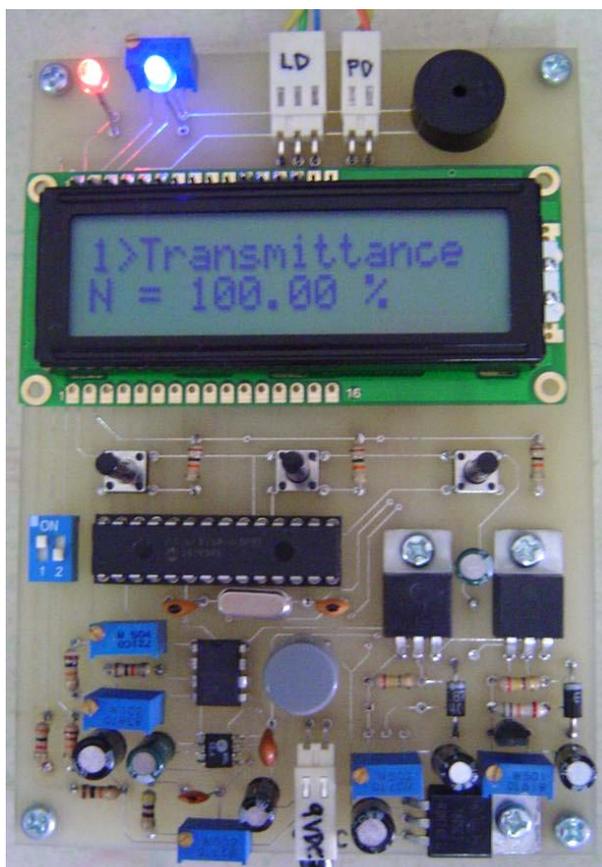
ภาพที่ 43 การต่อสวิตช์กับไมโครคอนโทรลเลอร์

5.6 เสถียรภาพการทำงานของเซนเซอร์

เสถียรภาพของเซนเซอร์จะขึ้นอยู่กับความคงที่ของค่าเปอร์เซ็นต์ส่งผ่านแสงที่ตรวจวัดได้ ซึ่งเกิดจากการทำงานของวงจรทั้งหมดได้แก่ วงจรขับเลเซอร์, วงจรตรวจวัดความเข้มแสง, วงจรขยายสัญญาณ, วงจรส่วนประมวลผลและแสดงผล ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 44 จากผลการทดลองตรวจวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงขณะไม่มีตัวอย่างพลาสติก ณ เวลาต่างๆ ตามตารางที่ 7 จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่แสดงทางจอ LCD มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1 % ดังนั้นจึงถือได้ว่าเซนเซอร์ที่ออกแบบมีเสถียรภาพเหมาะสมต่อการใช้งาน

ตารางที่ 7 เปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงที่ตรวจวัดได้ ณ เวลาต่างๆ ขณะไม่มีตัวอย่าง

เวลา (วินาที)	1	5	10	30	60	300	900	1800
ค่าการส่งผ่านแสง (%)	100.00	99.90	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00



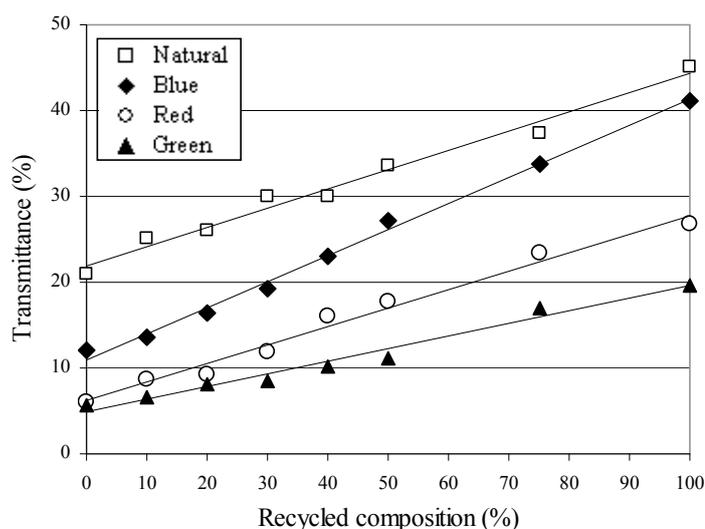
ภาพที่ 44 ลักษณะอุปกรณ์ทั้งหมดของวงจรเซนเซอร์

6. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลและค่าสมบัติทางกล

การวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลและค่าสมบัติทางกลบางประการของตัวอย่างพลาสติกที่จัดทำขึ้น

6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงและอัตราส่วนผสมรีไซเคิล

จากผลการวัดค่าสเปกตรัมด้วยสเปกโตรมิเตอร์ในภาพที่ 18 ถึง 21 เมื่อพิจารณาเฉพาะที่ความยาวคลื่น 1550 nm จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลของตัวอย่างพลาสติกที่ใช้ทดลองดังภาพที่ 45 และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลของตัวอย่างแต่ละสี และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) จะได้ดังสมการที่ 12



ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลของตัวอย่างแต่ละสี จากการวัดด้วยสเปกโตรมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 1550 nm

$$T_N = 0.225r + 21.868 \quad (12a)$$

$$(R^2 = 0.983)$$

$$T_B = 0.303r + 10.983 \quad (12b)$$

$$(R^2 = 0.995)$$

$$T_R = 0.217r + 6.150 \quad (12c)$$

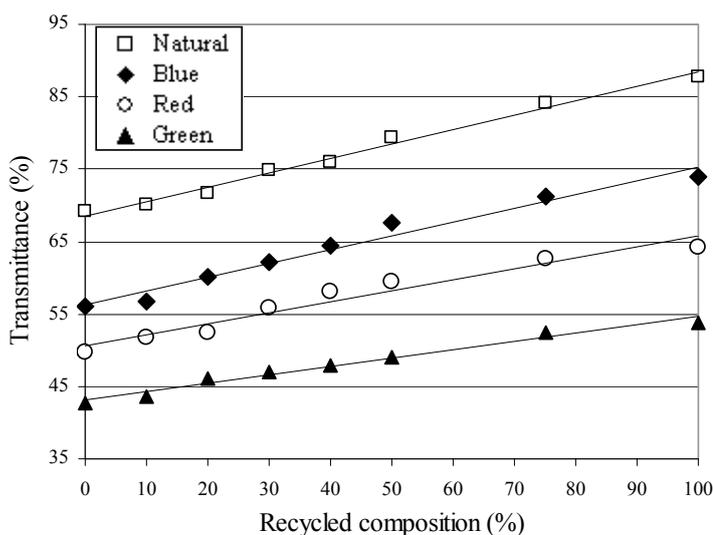
$$(R^2 = 0.983)$$

$$T_G = 0.146r + 4.896 \quad (12d)$$

$$(R^2 = 0.979)$$

เมื่อ T_N = เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวอย่างไม่ผสมสีที่วัดด้วยสเปกโตรมิเตอร์
 T_B = เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวอย่างสีน้ำเงินที่วัดด้วยสเปกโตรมิเตอร์
 T_R = เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวอย่างสีแดงที่วัดด้วยสเปกโตรมิเตอร์
 T_G = เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวอย่างสีเขียวที่วัดด้วยสเปกโตรมิเตอร์
 r = อัตราส่วนผสมรีไซเคิล (%)
 R^2 = ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

เมื่อทดลองใช้เลนเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นตรวจวัดค่าการส่งผ่านแสงของตัวอย่างพลาสติกขึ้นเคียวกับที่ทดสอบด้วยสเปกโตรมิเตอร์ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลดังภาพที่ 46 และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลของตัวอย่างแต่ละสี และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) จะได้ดังสมการที่ 13



ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลของตัวอย่างแต่ละสี จากการวัดด้วยเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น

$$T_n = 0.198r + 68.594 \quad (13a)$$

$$(R^2 = 0.990)$$

$$T_b = 0.192r + 56.266 \quad (13b)$$

$$(R^2 = 0.970)$$

$$T_r = 0.151r + 50.618 \quad (13c)$$

$$(R^2 = 0.950)$$

$$T_g = 0.114r + 43.209 \quad (13d)$$

$$(R^2 = 0.980)$$

เมื่อ T_n = เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวอย่างไม่ผสมสีที่วัดด้วยเซนเซอร์
 T_b = เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวอย่างสีน้ำเงินที่วัดด้วยเซนเซอร์
 T_r = เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวอย่างสีแดงที่วัดด้วยเซนเซอร์
 T_g = เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวอย่างสีเขียวที่วัดด้วยเซนเซอร์

6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงและค่าความทนแรงดึง

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าความทนแรงดึงและอัตราส่วนผสมรีไซเคิลในสมการที่ 8 กับความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงและอัตราส่วนผสมรีไซเคิลที่วัดด้วยสเปกโตรมิเตอร์ในสมการที่ 12 โดยนำมาหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดึงกับเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวอย่างแต่ละสีที่วัดด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ดังสมการที่ 14

$$\sigma_N = 0.231T_N + 20.530 \quad (14a)$$

$$\sigma_B = 0.172T_B + 23.699 \quad (14b)$$

$$\sigma_R = 0.240T_R + 24.110 \quad (14c)$$

$$\sigma_G = 0.356T_G + 23.840 \quad (14d)$$

- เมื่อ σ_N = ค่าความทนแรงดึงของตัวอย่างไม่ผสมสีที่วัดด้วยสเปกโตรมิเตอร์
 σ_B = ค่าความทนแรงดึงของตัวอย่างสีน้ำเงินที่วัดด้วยสเปกโตรมิเตอร์
 σ_R = ค่าความทนแรงดึงของตัวอย่างสีแดงที่วัดด้วยสเปกโตรมิเตอร์
 σ_G = ค่าความทนแรงดึงของตัวอย่างสีเขียวที่วัดด้วยสเปกโตรมิเตอร์

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าความทนแรงดึงและอัตราส่วนผสมรีไซเคิลในสมการที่ 8 กับความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงและอัตราส่วนผสมรีไซเคิลที่วัดด้วยเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ในสมการที่ 13 โดยนำมาหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดึงกับเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวอย่างแต่ละสีที่วัดด้วยเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นดังสมการที่ 15

$$\sigma_n = 0.263T_n + 7.569 \quad (15a)$$

$$\sigma_b = 0.271T_b + 10.345 \quad (15b)$$

$$\sigma_r = 0.344T_r + 8.153 \quad (15c)$$

$$\sigma_g = 0.456T_g + 5.875 \quad (15d)$$

- เมื่อ σ_n = ค่าความทนแรงดึงของตัวอย่างไม่ผสมสีที่วัดด้วยเซนเซอร์
 σ_b = ค่าความทนแรงดึงของตัวอย่างสีน้ำเงินที่วัดด้วยเซนเซอร์
 σ_r = ค่าความทนแรงดึงของตัวอย่างสีแดงที่วัดด้วยเซนเซอร์
 σ_g = ค่าความทนแรงดึงของตัวอย่างสีเขียวที่วัดด้วยเซนเซอร์

6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงและค่าความทนแรงกระแทก

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าความทนแรงกระแทกและอัตราส่วนผสมรีไซเคิลในสมการที่ 9 กับความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงและอัตราส่วนผสมรีไซเคิลที่วัดด้วยสเปกโตรมิเตอร์ในสมการที่ 12 โดยนำมาหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จะได้รับความสัมพันธ์

ระหว่างค่าความทนแรงกระแทกกับเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวอย่างแต่ละสีที่วัดด้วยสเปกโตรมิเตอร์ดังสมการที่ 16

$$E_N = -0.053T_N + 4.465 \quad (16a)$$

$$E_B = -0.040T_B + 3.734 \quad (16b)$$

$$E_R = -0.055T_R + 3.639 \quad (16c)$$

$$E_G = -0.082T_G + 3.701 \quad (16d)$$

เมื่อ E_N = ค่าความทนแรงกระแทกของตัวอย่างไม่ผสมสีที่วัดด้วยสเปกโตรมิเตอร์
 E_B = ค่าความทนแรงกระแทกของตัวอย่างสีน้ำเงินที่วัดด้วยสเปกโตรมิเตอร์
 E_R = ค่าความทนแรงกระแทกของตัวอย่างสีแดงที่วัดด้วยสเปกโตรมิเตอร์
 E_G = ค่าความทนแรงกระแทกของตัวอย่างสีเขียวที่วัดด้วยสเปกโตรมิเตอร์

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าความทนแรงกระแทกและอัตราส่วนผสมรีไซเคิลในสมการที่ 9 กับความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงและอัตราส่วนผสมรีไซเคิลที่วัดด้วยเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ในสมการที่ 13 โดยนำมาหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงกระแทกกับเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวอย่างแต่ละสีที่วัดด้วยเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นดังสมการที่ 17

$$E_n = -0.061T_n + 7.456 \quad (17a)$$

$$E_b = -0.063T_b + 6.816 \quad (17b)$$

$$E_r = -0.079T_r + 7.322 \quad (17c)$$

$$E_g = -0.105T_g + 7.847 \quad (17d)$$

เมื่อ E_n = ค่าความทนแรงกระแทกของตัวอย่างไม่ผสมสีที่วัดด้วยเซนเซอร์

E_b = ค่าความทนแรงกระแทกของตัวอย่างสีน้ำเงินที่วัดด้วยเซนเซอร์

E_r = ค่าความทนแรงกระแทกของตัวอย่างสีแดงที่วัดด้วยเซนเซอร์

E_g = ค่าความทนแรงกระแทกของตัวอย่างสีเขียวที่วัดด้วยเซนเซอร์

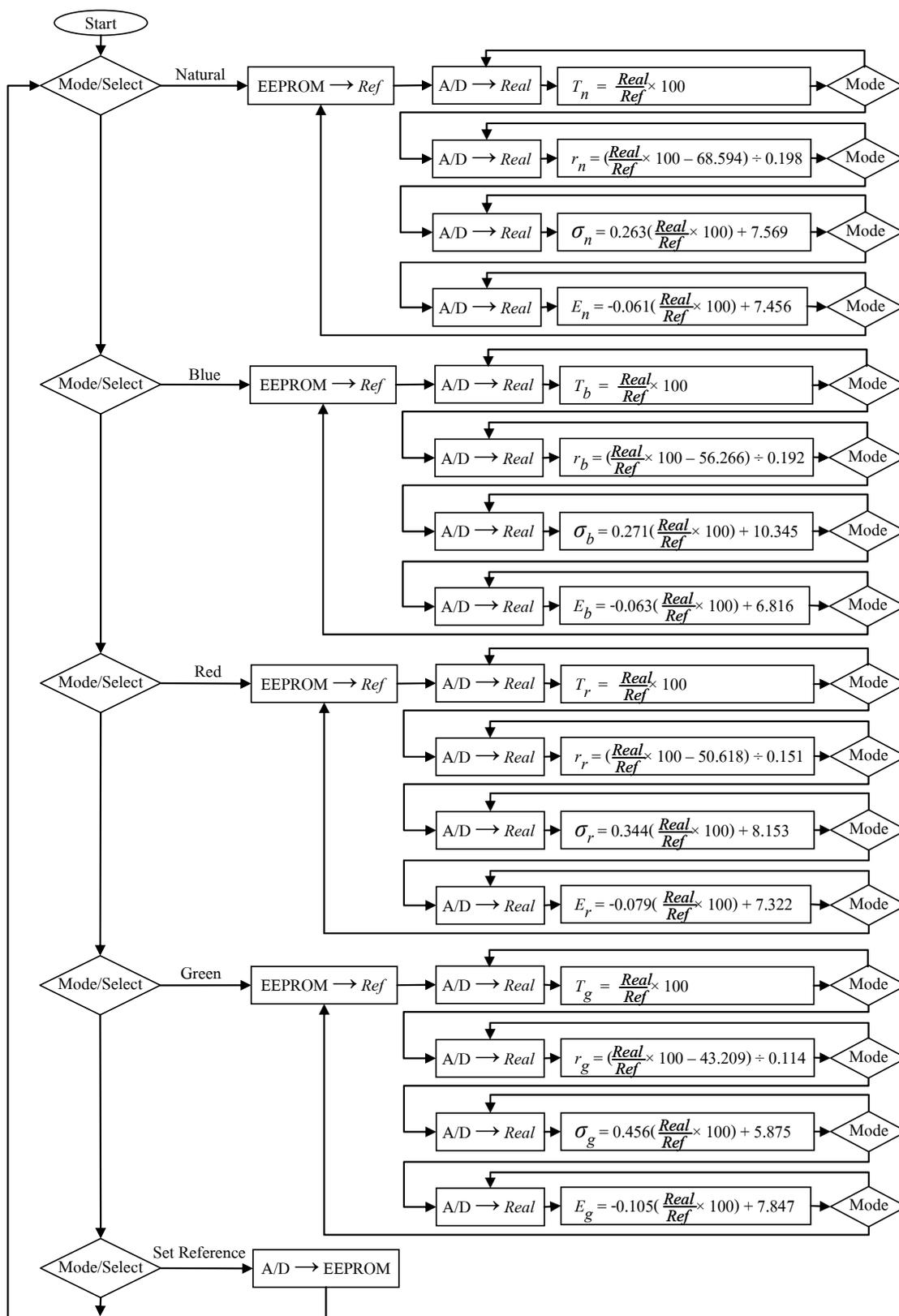
7. การพัฒนาโปรแกรมเพื่อตรวจวัดคุณสมบัติบางประการของพลาสติกรีไซเคิล

เมื่อพิจารณาคูสมบัติบางประการของตัวอย่างพลาสติกที่จัดทำขึ้นได้แก่ อัตราส่วนผสมรีไซเคิล, ความทนแรงดึง และความทนแรงกระแทก จะเห็นว่าทั้งหมดมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ตรวจวัดด้วยเซนเซอร์ดังสมการที่ 13, 15, และ 17 ตามลำดับ จากสมการดังกล่าวสามารถเขียนโปรแกรมให้หน่วยประมวลผลของเลเซอร์โคโอดเซนเซอร์คำนวณและแสดงผลการตรวจวัดคุณสมบัติของตัวอย่างพลาสติกดังกล่าวได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสีของตัวอย่างมีผลต่อค่าการส่งผ่านแสง ดังนั้นในการตรวจวัดผู้ใช้จึงจำเป็นต้องระบุสีของตัวอย่างให้กับเซนเซอร์ โดยแผนภาพการทำงานของโปรแกรมแสดงดังภาพที่ 47

เมื่อเริ่มต้นใช้งานเซนเซอร์ โปรแกรมจะตรวจสอบเงื่อนไขของผู้ใช้จากการกดสวิตช์ Mode ว่าตัวอย่างที่ใช้ตรวจสอบมีสีใดระหว่างไม่ผสมสี, สีน้ำเงิน, สีแดง, สีเขียว หรือต้องการตั้งค่าอ้างอิง หลังจากนั้นเมื่อผู้ใช้กดสวิตช์ Select อีกครั้งจะเป็นการยืนยันการทำงาน

หลังจากระบุสีของตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัดแล้ว ผู้ใช้สามารถเลือกชนิดการตรวจวัดจากการกดสวิตช์ Mode อีกครั้งเพื่อเลือกชนิดการตรวจวัดที่ต้องการ ซึ่งประกอบไปด้วยการตรวจวัดเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง, การตรวจวัดอัตราส่วนผสมรีไซเคิล, การตรวจวัดค่าความทนแรงดึง และการตรวจวัดค่าความทนแรงกระแทก เมื่อมีการกดสวิตช์หนึ่งครั้งเซนเซอร์จะเปลี่ยนสมการในการคำนวณหนึ่งครั้ง โดยเซนเซอร์จะเริ่มคำนวณจากสมการความสัมพันธ์แบบวนรอบตามลำดับ ดังนี้ การตรวจวัดเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง, การตรวจวัดอัตราส่วนผสมรีไซเคิล, การตรวจวัดค่าความทนแรงดึง และการตรวจวัดค่าความทนแรงกระแทก

หากต้องการเปลี่ยนสีของตัวอย่างในการตรวจวัด หรือตั้งค่าอ้างอิง สามารถทำได้โดยการกดสวิตช์ Reset เพื่อเริ่มต้นการทำงานของโปรแกรมใหม่ และเลือกสีที่ต้องการตรวจวัด หรือตั้งค่าอ้างอิงอีกครั้ง



ภาพที่ 47 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมที่ได้พัฒนาแล้ว

ผลและวิจารณ์

ผล

จากการทดลองใช้สเปกโตรมิเตอร์และเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นตรวจวัดคุณสมบัติบางประการของตัวอย่างผลิตภัณฑ์พลาสติกรีไซเคิลได้ผลดังนี้

1. ผลการตรวจวัดเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง

ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนผสมรีไซเคิลกับค่าการส่งผ่านแสงจากการใช้สเปกโตรมิเตอร์และจากเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์แสดงในภาพที่ 45 และ 46 ตามลำดับ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในตารางที่ 8 เป็นผลการตรวจวัดเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวอย่างพลาสติกทั้ง 32 ชิ้น ด้วยสเปกโตรมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 1550 nm และจากการใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น

ตารางที่ 8 ผลการตรวจวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยสเปกโตรมิเตอร์และเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์

ชื่อตัวอย่าง	ค่าการส่งผ่านแสง (%)		ค่าแตกต่าง
	สเปกโตรมิเตอร์	เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์	
N000	20.91	69.16	48.25
N010	25.14	70.15	45.01
N020	26.11	71.78	45.67
N030	29.92	74.77	44.85
N040	29.97	75.87	45.90
N050	33.58	79.36	45.78
N075	37.43	84.14	46.71
N100	45.09	87.73	42.64
B000	12.01	55.96	43.95
B010	13.57	56.72	43.15
B020	16.40	60.23	43.83
B030	19.23	62.12	42.89

ตารางที่ 8 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ค่าการส่งผ่านแสง (%)		ค่าแตกต่าง
	สเปกโตรมิเตอร์	เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์	
B040	23.02	64.50	41.48
B050	27.21	67.69	40.48
B075	33.81	71.28	37.47
B100	41.19	73.85	32.66
R000	6.03	49.81	43.78
R010	8.66	51.84	43.18
R020	9.28	52.34	43.06
R030	11.82	55.76	43.94
R040	16.09	58.14	42.05
R050	17.72	59.42	41.70
R075	23.32	62.62	39.30
R100	26.73	64.11	37.38
G000	5.57	42.81	37.24
G010	6.60	43.65	37.05
G020	8.13	46.03	37.90
G030	8.47	46.92	38.45
G040	10.21	48.01	37.80
G050	11.22	49.10	37.88
G075	16.89	52.38	35.49
G100	19.65	53.83	34.18

2. ผลการตรวจวัดอัตราส่วนผสมรีไซเคิล

จากการใช้สเปกโตรมิเตอร์ตรวจวัดเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของแต่ละตัวอย่างแล้วแทนค่าที่ได้ในสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงและอัตราส่วนผสมรีไซเคิลในสมการที่ 12 จะได้ค่าอัตราส่วนผสมรีไซเคิลของแต่ละตัวอย่างดังตารางที่ 9 และจากการใช้เซนเซอร์ที่สร้างขึ้นในโหมดการตรวจวัดค่าอัตราส่วนผสมรีไซเคิลจะได้ค่าอัตราส่วนผสมรีไซเคิลของแต่ละตัวอย่างดังตารางที่ 10 โดยเปรียบเทียบผลการตรวจวัดอัตราส่วนผสมรีไซเคิลจากทั้งสองวิธีกับการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 32 แบบได้ดังภาพที่ 48

ตารางที่ 9 ผลการตรวจวัดค่าอัตราส่วนผสมรีไซเคิลด้วยสเปกโตรมิเตอร์

ชื่อตัวอย่าง	อัตราส่วนผสมรีไซเคิล (%)		
	การเตรียมตัวอย่าง	สเปกโตรมิเตอร์	ค่าคลาดเคลื่อน
N000	0	-4.27	-4.27
N010	10	14.55	4.55
N020	20	18.84	-1.16
N030	30	35.77	5.77
N040	40	36.01	-3.99
N050	50	52.07	2.07
N075	75	69.17	-5.83
N100	100	103.20	3.20
B000	0	3.39	3.39
B010	10	8.53	-1.47
B020	20	17.88	-2.12
B030	30	27.22	-2.78
B040	40	39.73	-0.27
B050	50	53.54	3.54
B075	75	75.33	0.33
B100	100	99.71	-0.29
R000	0	-0.54	-0.54

ตารางที่ 9 (ต่อ)

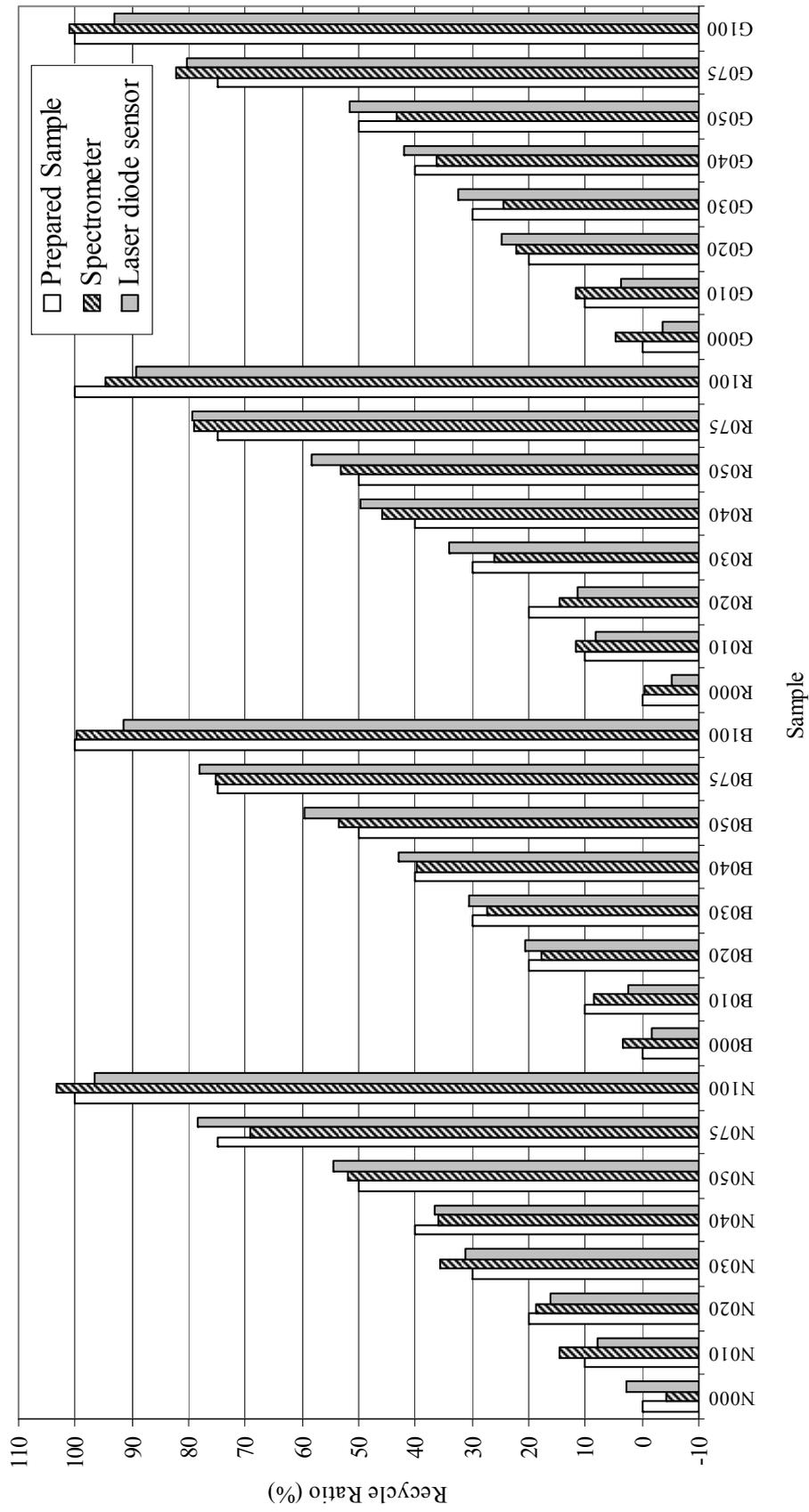
ชื่อตัวอย่าง	อัตราส่วนผสมรีไซเคิล (%)		
	การเตรียมตัวอย่าง	สเปกโตรมิเตอร์	ค่าคลาดเคลื่อน
R010	10	11.58	1.58
R020	20	14.42	-5.58
R030	30	26.13	-3.87
R040	40	45.79	5.79
R050	50	53.34	3.34
R075	75	79.11	4.11
R100	100	94.82	-5.18
G000	0	4.65	4.65
G010	10	11.69	1.69
G020	20	22.18	2.18
G030	30	24.48	-5.52
G040	40	36.39	-3.61
G050	50	43.32	-6.68
G075	75	82.18	7.18
G100	100	101.09	1.09

ตารางที่ 10 ผลการตรวจวัดค่าอัตราส่วนผสมรีไซเคิลด้วยเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น

ชื่อตัวอย่าง	อัตราส่วนผสมรีไซเคิล (%)		
	การเตรียมตัวอย่าง	เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์	ค่าคลาดเคลื่อน
N000	0	2.84	2.84
N010	10	7.84	-2.16
N020	20	16.07	-3.93
N030	30	31.17	1.17
N040	40	36.73	-3.27
N050	50	54.35	4.35

ตารางที่ 10 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	อัตราส่วนผสมรีไซเคิล (%)		
	การเตรียมตัวอย่าง	เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์	ค่าคลาดเคลื่อน
N075	75	78.49	3.49
N100	100	96.63	-3.37
B000	0	-1.59	-1.59
B010	10	2.36	-7.64
B020	20	20.62	0.62
B030	30	30.46	0.46
B040	40	42.84	2.84
B050	50	59.44	9.44
B075	75	78.12	3.12
B100	100	91.49	-8.51
R000	0	-5.35	-5.35
R010	10	8.09	-1.91
R020	20	11.40	-8.60
R030	30	34.05	4.05
R040	40	49.81	9.81
R050	50	58.29	8.29
R075	75	79.48	4.48
R100	100	89.35	-10.65
G000	0	-3.50	-3.50
G010	10	3.87	-6.13
G020	20	24.75	4.75
G030	30	32.55	2.55
G040	40	42.11	2.11
G050	50	51.68	1.68
G075	75	80.45	5.45
G100	100	93.17	-6.83



ภาพที่ 48 เปรียบเทียบผลการตรวจคัดสรรส่วนผสมระหว่างการผลิตตัวอย่างกับสเปกโตรมิเตอร์และเลเซอร์ไดโอดของตัวอย่างทั้ง 32 แบบ

3. ผลการตรวจวัดค่าความทนแรงดึง

จากการใช้สเปกโตรมิเตอร์ตรวจวัดเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของแต่ละตัวอย่างแล้วแทนค่าที่ได้ในสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงและค่าความทนแรงดึงในสมการที่ 14 จะได้ค่าความทนแรงดึงของแต่ละตัวอย่างดังตารางที่ 11 และจากการใช้เซนเซอร์ที่สร้างขึ้นในโหมดการตรวจวัดค่าความทนแรงดึง จะได้ค่าความทนแรงดึงของแต่ละตัวอย่างดังตารางที่ 12 โดยเปรียบเทียบผลการตรวจวัดค่าความทนแรงดึงระหว่าง Universal testing machine กับสเปกโตรมิเตอร์และเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นของตัวอย่างทั้ง 32 แบบ ได้ดังภาพที่ 49

ตารางที่ 11 ผลการตรวจวัดค่าความทนแรงดึงด้วยสเปกโตรมิเตอร์

ชื่อตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (N/mm ²)		
	Universal testing machine	สเปกโตรมิเตอร์	ค่าคลาดเคลื่อน
N000	25.90	25.36	-0.54
N010	25.82	26.34	0.52
N020	26.43	26.56	0.13
N030	27.28	27.44	0.16
N040	27.34	27.45	0.12
N050	28.43	28.29	-0.14
N075	29.56	29.18	-0.39
N100	30.65	30.95	0.30
B000	25.90	25.76	-0.13
B010	25.82	26.03	0.21
B020	26.43	26.52	0.09
B030	27.28	27.01	-0.27
B040	27.34	27.66	0.32
B050	28.43	28.38	-0.05
B075	29.56	29.51	-0.05
B100	30.65	30.78	0.14
R000	25.90	25.56	-0.34

ตารางที่ 11 (ต่อ)

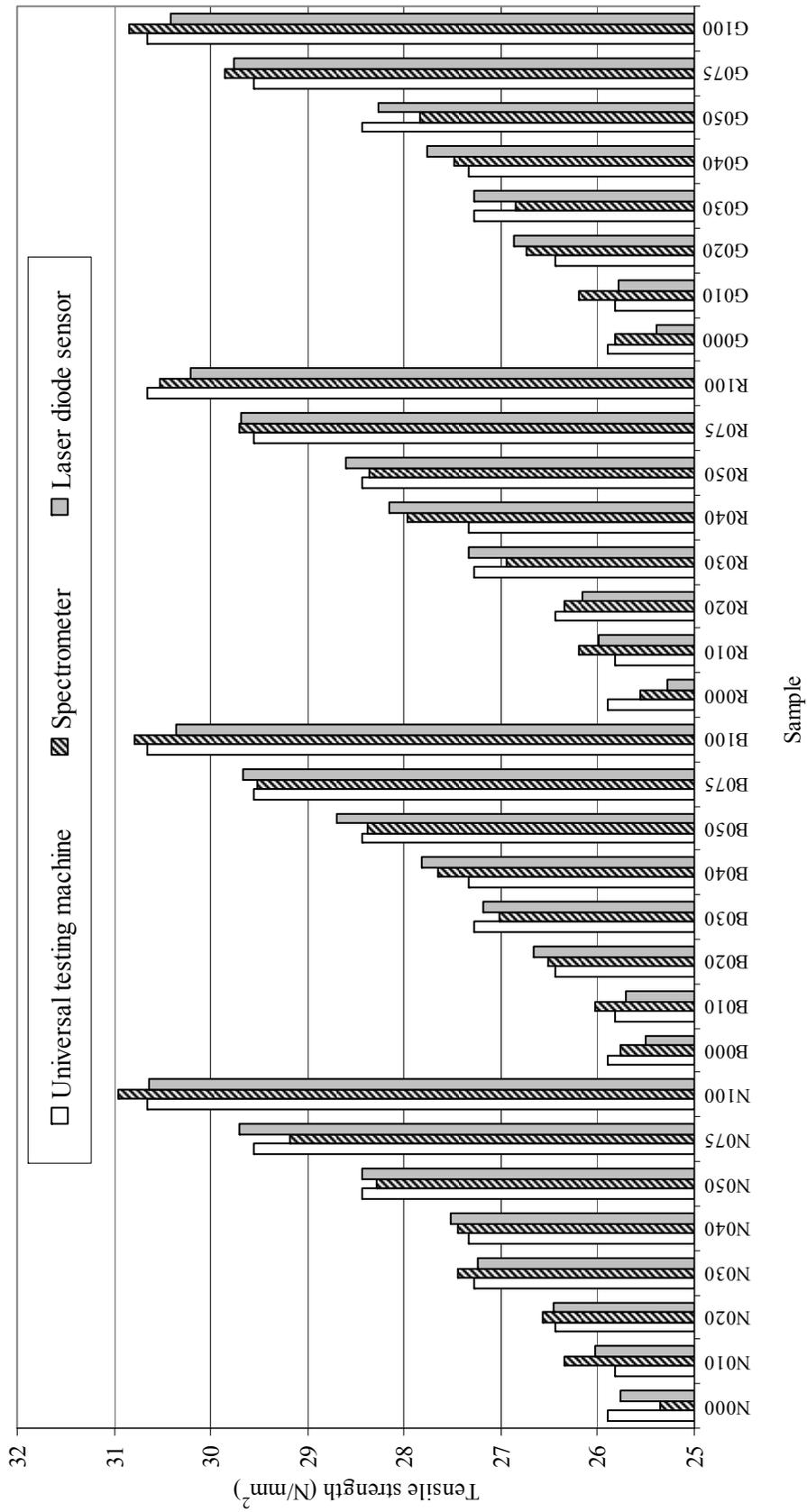
ชื่อตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (N/mm ²)		
	Universal testing machine	สเปกโตรมิเตอร์	ค่าคลาดเคลื่อน
R010	25.82	26.19	0.37
R020	26.43	26.34	-0.09
R030	27.28	26.95	-0.33
R040	27.34	27.97	0.63
R050	28.43	28.36	-0.07
R075	29.56	29.71	0.14
R100	30.65	30.52	-0.12
G000	25.90	25.82	-0.07
G010	25.82	26.19	0.37
G020	26.43	26.74	0.31
G030	27.28	26.86	-0.42
G040	27.34	27.47	0.14
G050	28.43	27.83	-0.60
G075	29.56	29.85	0.29
G100	30.65	30.84	0.19

ตารางที่ 12 ผลการตรวจวัดค่าความทนแรงดึงด้วยเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น

ชื่อตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (N/mm ²)		
	Universal testing machine	เซนเซอร์ไดโอดเซนเซอร์	ค่าคลาดเคลื่อน
N000	25.90	25.76	-0.14
N010	25.82	26.02	0.20
N020	26.43	26.45	0.02
N030	27.28	27.23	-0.04
N040	27.34	27.52	0.18
N050	28.43	28.44	0.01

ตารางที่ 12 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (N/mm ²)		
	Universal testing machine	เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์	ค่าคลาดเคลื่อน
N075	29.56	29.70	0.13
N100	30.65	30.64	-0.01
B000	25.90	25.51	-0.38
B010	25.82	25.72	-0.10
B020	26.43	26.67	0.24
B030	27.28	27.18	-0.10
B040	27.34	27.82	0.49
B050	28.43	28.69	0.26
B075	29.56	29.66	0.10
B100	30.65	30.36	-0.29
R000	25.90	25.29	-0.61
R010	25.82	25.99	0.17
R020	26.43	26.16	-0.27
R030	27.28	27.33	0.06
R040	27.34	28.15	0.82
R050	28.43	28.59	0.16
R075	29.56	29.69	0.13
R100	30.65	30.21	-0.44
G000	25.90	25.40	-0.50
G010	25.82	25.78	-0.04
G020	26.43	26.86	0.44
G030	27.28	27.27	-0.01
G040	27.34	27.77	0.43
G050	28.43	28.26	-0.17
G075	29.56	29.76	0.20
G100	30.65	30.42	-0.23



ภาพที่ 49 เปรียบเทียบผลการตรวจวัดค่าความทนแรงดึงระหว่าง Universal testing machine กับสเปกโตรมิเตอร์และเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์
ของตัวอย่างทั้ง 32 แบบ

4. ผลการตรวจวัดค่าความทนแรงกระแทก

จากการใช้สเปกโตรมิเตอร์ตรวจวัดเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของแต่ละตัวอย่างแล้วแทนค่าที่ได้ในสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงและค่าความทนแรงกระแทกในสมการที่ 16 จะได้ค่าความทนแรงกระแทกของแต่ละตัวอย่างดังตารางที่ 13 และจากการใช้เซนเซอร์ที่สร้างขึ้นในโหมดการตรวจวัดค่าความทนแรงกระแทก จะได้ค่าความทนแรงกระแทกของแต่ละตัวอย่างดังตารางที่ 14 โดยเปรียบเทียบผลการตรวจวัดค่าความทนแรงกระแทกระหว่างสเปกโตรมิเตอร์กับเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์และ Pendulum impact tester ของบางตัวอย่างได้ดังภาพที่ 50

ตารางที่ 13 ผลการตรวจวัดค่าความทนแรงกระแทกด้วยสเปกโตรมิเตอร์

ชื่อตัวอย่าง	ความทนแรงกระแทก (mJ/mm ²)		
	Pendulum impact tester	สเปกโตรมิเตอร์	ค่าคลาดเคลื่อน
N000	3.29	3.36	0.07
N010	-	3.13	-
N020	3.16	3.08	-0.08
N030	2.97	2.88	-0.09
N040	-	2.88	-
N050	2.80	2.69	-0.11
N075	2.75	2.48	-0.27
N100	1.85	2.08	0.23
B000	3.29	3.25	-0.04
B010	-	3.19	-
B020	3.16	3.08	-0.08
B030	2.97	2.96	-0.01
B040	-	2.81	-
B050	2.80	2.65	-0.15
B075	2.75	2.38	-0.37
B100	1.85	2.09	0.24
R000	3.29	3.31	0.02

ตารางที่ 13 (ต่อ)

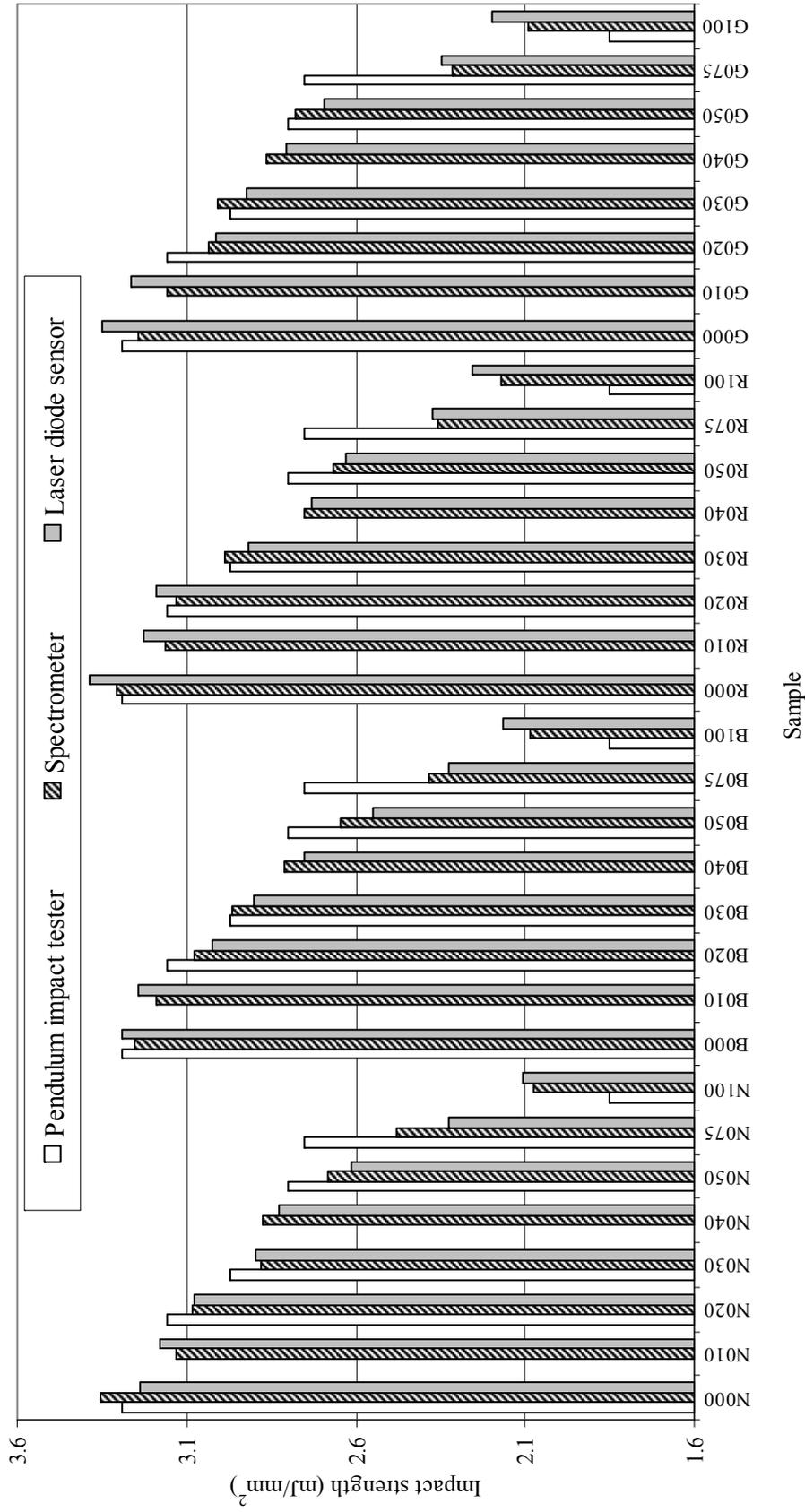
ชื่อตัวอย่าง	ความทนแรงกระแทก (mJ/mm ²)		
	Pendulum impact tester	สเปกโตรมิเตอร์	ค่าคลาดเคลื่อน
R010	-	3.16	-
R020	3.16	3.13	-0.03
R030	2.97	2.99	0.02
R040	-	2.75	-
R050	2.80	2.66	-0.14
R075	2.75	2.36	-0.39
R100	1.85	2.17	0.32
G000	3.29	3.24	-0.05
G010	-	3.16	-
G020	3.16	3.03	-0.13
G030	2.97	3.01	0.04
G040	-	2.86	-
G050	2.80	2.78	-0.02
G075	2.75	2.32	-0.43
G100	1.85	2.09	0.24

ตารางที่ 14 ผลการตรวจวัดค่าความทนแรงกระแทกด้วยเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น

ชื่อตัวอย่าง	ความทนแรงกระแทก (mJ/mm ²)		
	Pendulum impact tester	เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์	ค่าคลาดเคลื่อน
N000	3.29	3.24	-0.05
N010	-	3.18	-
N020	3.16	3.08	-0.08
N030	2.97	2.90	-0.07
N040	-	2.83	-
N050	2.80	2.62	-0.18

ตารางที่ 14 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ความทนแรงกระแทก (mJ/mm ²)		
	Pendulum impact tester	เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์	ค่าคลาดเคลื่อน
N075	2.75	2.32	-0.43
N100	1.85	2.10	0.25
B000	3.29	3.29	0.00
B010	-	3.24	-
B020	3.16	3.02	-0.14
B030	2.97	2.90	-0.07
B040	-	2.75	-
B050	2.80	2.55	-0.25
B075	2.75	2.33	-0.42
B100	1.85	2.16	0.31
R000	3.29	3.39	0.10
R010	-	3.23	-
R020	3.16	3.19	0.03
R030	2.97	2.92	-0.05
R040	-	2.73	-
R050	2.80	2.63	-0.17
R075	2.75	2.38	-0.37
R100	1.85	2.26	0.41
G000	3.29	3.35	0.06
G010	-	3.26	-
G020	3.16	3.01	-0.15
G030	2.97	2.92	-0.05
G040	-	2.81	-
G050	2.80	2.69	-0.11
G075	2.75	2.35	-0.40
G100	1.85	2.19	0.34



ภาพที่ 50 เปรียบเทียบผลการตรวจวัดค่าความทนแรงกระแทกระหว่าง Pendulum impact tester กับสเปกโตรมิเตอร์และเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์
ของบางตัวอย่าง

วิจารณ์

1. การตรวจวัดอัตราส่วนผสมรีไซเคิลและสมบัติทางกลบางประการด้วยเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น

จากผลการทดลองตรวจวัดคุณสมบัติบางประการของตัวอย่างพลาสติกที่มีสีและอัตราส่วนผสมรีไซเคิลต่างกันทั้งหมด 32 ชิ้น พบว่าวิธีการใช้สเปกโตรมิเตอร์และเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์สามารถตรวจวัดคุณลักษณะต่างๆได้ อย่างไรก็ตามค่าคุณสมบัติทางกลที่ตรวจวัดได้จากทั้งสองวิธีมีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ตรวจวัดด้วยวิธีทั่วไป งานวิจัยนี้เลือกใช้การคำนวณค่าคลาดเคลื่อนทางสถิติด้วยวิธี Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) ซึ่งมีสูตรการคำนวณดังสมการที่ 18 ค่าที่ได้จากการคำนวณจะเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ซึ่งเกิดจากค่าที่วัดได้จากสมการความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นเบี่ยงเบนไปจากค่าที่วัดได้จริงจากการเตรียมตัวอย่าง, การวัดค่าความทนแรงดึงด้วย Universal testing machine, ค่าความทนแรงกระแทกด้วย Pendulum impact tester ดังแสดงในตารางที่ 15

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100 \quad (18)$$

เมื่อ e_i = ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าจริงที่วัดได้กับค่าที่ประมาณได้

x_{\max} = ค่าสูงสุดของค่าจริงที่วัดได้

x_{\min} = ค่าต่ำสุดของค่าจริงที่วัดได้

ตารางที่ 15 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของวิธีสเปกโตรมิเตอร์และเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์เทียบกับค่าที่วัดได้จริง

วิธีการตรวจวัด	NRMSE (%)	
	สเปกโตรมิเตอร์	เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์
อัตราส่วนผสมรีไซเคิล (จากการเตรียมตัวอย่าง)	3.89	5.32
ค่าความทนแรงดึง (Universal testing machine)	6.18	6.19
ค่าความทนแรงกระแทก (Pendulum impact tester)	13.60	16.35

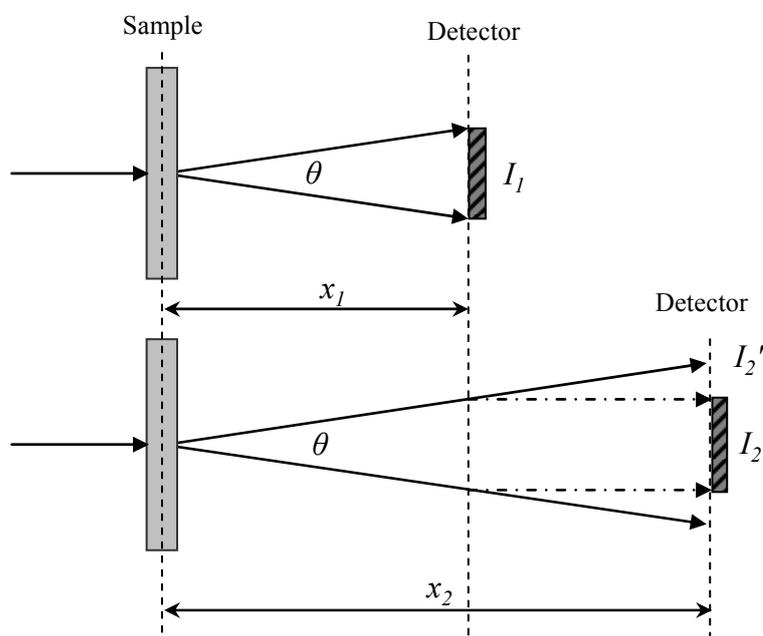
จากตารางที่ 15 พบว่าการใช้สเปกโตรมิเตอร์ตรวจวัดอัตราส่วนผสมรีไซเคิลมีค่า *NRMSE* เพียง 3.89 % ทั้งนี้ค่าความคลาดเคลื่อนจากการตรวจวัดดังกล่าวเกิดจากการที่ข้อมูลของค่าการส่งผ่านแสงและอัตราส่วนผสมรีไซเคิลผันผวนจากสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นที่สร้างขึ้น นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง ซึ่งสาเหตุหลักอาจมาจากอัตราส่วนผสมรีไซเคิลของตัวอย่างพลาสติกที่จัดทำขึ้นไม่ตรงตามที่กำหนดไว้ เนื่องจากการกระจายตัวที่ไม่เท่ากันของปริมาณเม็ดพลาสติกบริสุทธิ์และเม็ดพลาสติกรีไซเคิล รวมทั้งการกระจายตัวของสีที่ผสมภายในเครื่องฉีดพลาสติก ทำให้แต่ละส่วนของชิ้นงานตัวอย่างอาจมีความหนาแน่นของพลาสติกและสีไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ควบคุมได้ยาก จากสาเหตุดังกล่าว หากตำแหน่งที่แสงตกกระทบกับชิ้นงานตัวอย่างเปลี่ยนไป อาจทำให้ค่าการส่งผ่านแสงแตกต่างกันในการวัดแต่ละครั้ง

ค่าความทนแรงดึงที่ทดสอบด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์นั้นมีค่า *NRMSE* อยู่ที่ 6.18 % ซึ่งมากกว่าการตรวจวัดอัตราส่วนผสมรีไซเคิล ทั้งนี้เป็นเพราะความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าความทนแรงดึงและค่าการส่งผ่านแสงที่สร้างขึ้นนั้นเกิดจากการหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของสองสมการคือค่าการส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลและค่าความทนแรงดึงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิล ดังนั้นนอกจากความผันผวนของค่าการส่งผ่านแสงและอัตราส่วนผสมรีไซเคิลแล้วยังมีความผันผวนที่เกิดจากการทดสอบค่าความทนแรงดึงด้วย ส่วนค่า *NRMSE* ของความทนแรงดึงที่ทดสอบด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์นั้นมีค่ามากถึง 13.60 % ทั้งนี้เป็นเพราะสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าความทนแรงดึงกระทบกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลมีค่าน้อยกว่าการทดสอบประเภทอื่น ซึ่งสาเหตุของความคลาดเคลื่อนเกิดจากระบวนการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงกระทกก่อนข้างจะมีความไม่แน่นอนสูง ดังได้กล่าวไปแล้วในการทดสอบค่าความทนแรงดึงกระทก

สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนที่ทดสอบด้วยเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นนั้นเป็นไปในลักษณะเดียวกับการทดสอบด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ แต่มีค่าคลาดเคลื่อนมากกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะความผันผวนของค่าการส่งผ่านแสงที่วัดได้จากเลเซอร์ไดโอดมีมากกว่าเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งอาจเป็นเพราะการทดสอบด้วยสเปกโตรมิเตอร์เป็นระบบปิด ไม่มีแสงรบกวนจากภายนอก รวมทั้งอุปกรณ์ภายในเครื่องเช่นแหล่งกำเนิดแสงและตัวตรวจวัดแสงมีประสิทธิภาพค่อนข้างดี อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่า *NRMSE* โดยรวมแล้วพบว่าวิธีการที่ใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์มีค่ามากกว่าสเปกโตรมิเตอร์ไม่เกิน 3 % จึงอาจกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพการตรวจวัดคุณสมบัติบางประการของตัวอย่างพลาสติกที่จัดทำขึ้นด้วยเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์เทียบเท่ากับการใช้สเปกโตรมิเตอร์

2. ความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงระหว่างสเปกโตรมิเตอร์และเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลการตรวจวัดค่าการส่งผ่านแสงระหว่างสเปกโตรมิเตอร์และเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นของตัวอย่างชิ้นเดียวกันจะเห็นว่าผลที่ได้มีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก ทั้งนี้อาจมีสาเหตุหลักมาจากการกระจายแสงที่ส่งผ่านตัวอย่างพลาสติกและระยะห่างระหว่างตัวอย่างกับตัวตรวจวัดแสงของสเปกโตรมิเตอร์และเลเซอร์ที่สร้างขึ้นไม่เท่ากันดังภาพที่ 51 เมื่อพิจารณาเฉพาะแสงค่าหนึ่งที่สามารถส่งผ่านตัวอย่างได้นั้น แสงส่วนหนึ่งจะเกิดการกระจายทำให้ความเข้มแสงที่กระทบกับพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงบางส่วนไม่สามารถตรวจวัดได้



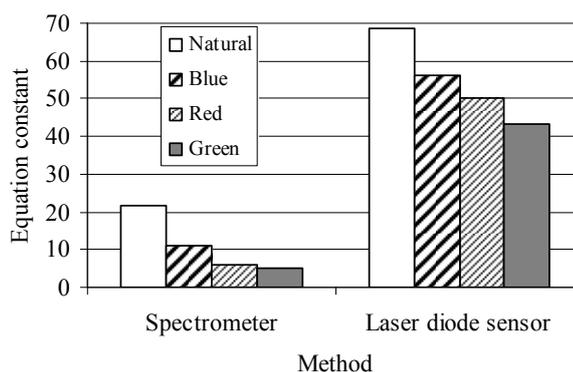
ภาพที่ 51 การลดลงของความเข้มแสงที่ตรวจวัดได้ตามระยะห่างระหว่างตัวอย่างกับตัวตรวจวัดแสง

เนื่องจากระยะห่างระหว่างตัวอย่างและตัวตรวจวัดแสงของสเปกโตรมิเตอร์มากกว่าเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นดังนั้นเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ได้จึงน้อยกว่าเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น อย่างไรก็ตามแม้จะเกิดการกระจายแสงดังกล่าวแต่ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนผสมรีไซเคิลกับค่าการส่งผ่านแสงของทั้งสเปกโตรมิเตอร์และเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นยังคงมีความเป็นเส้นตรงและมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากกว่า 0.95

3. ผลของสีต่อสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลของสเปกโตรมิเตอร์และเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น

3.1 ค่าคงที่ของสมการเส้นตรง

จากผลการตรวจวัดค่าการส่งผ่านแสงพบว่า นอกจากอัตราส่วนผสมรีไซเคิลที่แตกต่างกันแล้ว สีของตัวอย่างมีผลต่อค่าการส่งผ่านแสงด้วย โดยลำดับของสีที่มีค่าการส่งผ่านแสงมากที่สุด ได้แก่ ไม่ผสมสี, สีน้ำเงิน, สีแดง และสีเขียว ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับค่าคงที่ของสมการเส้นตรงในสมการที่ 12 และ 13 ดังแสดงในภาพที่ 52 ดังนั้นผลของสีจึงส่งผลโดยตรงต่อค่าคงที่ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับอัตราส่วนผสมรีไซเคิล เมื่อพิจารณาค่าส่งผ่านแสงของตัวอย่างพลาสติกในสมการที่ 7 จะพบว่าค่าการส่งผ่านแสงจะขึ้นอยู่กับ การดูดกลืนแสง, การสะท้อน และการกระเจิงแสง ดังนั้นผลของสีจะทำให้ค่าตัวแปรบางตัวหรือทั้งหมดเปลี่ยนไป

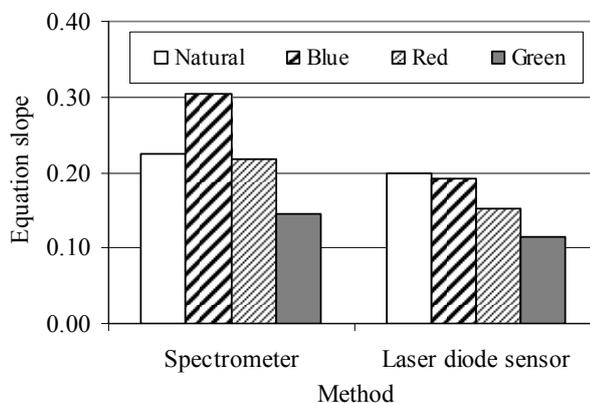


ภาพที่ 52 ค่าคงที่ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมรีไซเคิลกับค่าการส่งผ่านแสงของวิธีที่ใช้สเปกโตรมิเตอร์และวิธีที่ใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์

3.2 ความชันของสมการเส้นตรง

ความแตกต่างของค่าการส่งผ่านแสงของแต่ละตัวอย่างสามารถบอกความแตกต่างของอัตราส่วนผสมรีไซเคิลของแต่ละตัวอย่างได้ ความชัดเจนของความแตกต่างขึ้นอยู่กับค่าความชันของสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวอย่างแต่ละสีโดยค่าความชันมากจะทำให้ความแตกต่างมากขึ้นด้วย ซึ่งค่าความชันแต่ละสีของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงและอัตรา

ส่วนผสมรีไซเคิลในสมการที่ 12 สำหรับสเปกโตรมิเตอร์ และสมการที่ 13 สำหรับเลเซอร์ไดโอด เซนเซอร์แสดงดังภาพที่ 53



ภาพที่ 53 ความชันของสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมรีไซเคิลกับค่าการส่งผ่านแสงของวิธีที่ใช้สเปกโตรมิเตอร์และวิธีที่ใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์

จากภาพที่ 53 เมื่อพิจารณาค่าความชันของสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมรีไซเคิลกับค่าการส่งผ่านแสงของวิธีที่ใช้สเปกโตรมิเตอร์พบว่าลำดับสีที่มีค่าความชันของสมการมากที่สุดได้แก่สีน้ำเงิน, ไม่ผสมสี, สีแดง และสีเขียว ซึ่งลำดับดังกล่าวแตกต่างจากลำดับของสีที่มีค่าการส่งผ่านแสงมากที่สุด โดยความชันของสมการไม่ผสมสีมีค่าน้อยกว่าความชันของสมการสีน้ำเงิน ส่วนวิธีที่ใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์มีลำดับสีที่มีค่าความชันของสมการมากที่สุดได้แก่ไม่ผสมสี, สีน้ำเงิน, สีแดง และสีเขียว อย่างไรก็ตามจำนวนสีที่ทำการทดลองมีน้อยเกินไป ทำให้ยังไม่สามารถระบุความสัมพันธ์ระหว่างสีกับความชันของสมการอย่างละเอียดได้

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า สามารถใช้เทคนิคการตรวจวัดค่าส่งผ่านแสงเพื่อตรวจวัดอัตราส่วนผสมรีไซเคิล, ค่าความทนแรงดึง และค่าความทนแรงกระแทกของตัวอย่างผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีส่วนผสมของพลาสติกกรีไซเคิล จากการใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ได้ และจากเทคนิคดังกล่าวสามารถสร้างเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์เพื่อใช้ในการตรวจวัดค่าต่างๆ แทนการใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ได้

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงที่ทดสอบด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์และเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ช่วงความยาวคลื่น 1550 nm กับอัตราส่วนผสมรีไซเคิลของตัวอย่างพลาสติกที่จัดทำขึ้นเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากกว่า 0.95 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมรีไซเคิลกับค่าสมบัติทางกลอันได้แก่ ค่าความทนแรงดึงและค่าความทนแรงกระแทกนั้นมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.98 และ 0.82 ตามลำดับ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถใช้คณิตศาสตร์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับค่าความทนแรงดึงและค่าความทนแรงกระแทกเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นได้ ทำให้สามารถคำนวณค่าอัตราส่วนผสมรีไซเคิล, ค่าความทนแรงดึง และค่าความทนแรงกระแทกของตัวอย่างพลาสติกที่จัดทำขึ้นจากการตรวจวัดค่าการส่งผ่านแสงได้

วิธีที่ใช้ สเปกโตรมิเตอร์มีค่า $NRMSE$ ของการตรวจวัดอัตราส่วนผสมรีไซเคิลเมื่อเทียบกับการเตรียมตัวอย่างเท่ากับ 3.89%, ค่า $NRMSE$ ของการตรวจวัดค่าความทนแรงดึงเมื่อเทียบกับเครื่อง Universal testing machine เท่ากับ 6.18% และค่า $NRMSE$ ของการตรวจวัดค่าความทนแรงกระแทกเมื่อเทียบกับเครื่อง Pendulum impact tester เท่ากับ 13.60% ส่วนวิธีที่ใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นมีค่า $NRMSE$ ของการตรวจวัดอัตราส่วนผสมรีไซเคิลเมื่อเทียบกับการเตรียมตัวอย่างเท่ากับ 5.32%, ค่า $NRMSE$ ของการตรวจวัดค่าความทนแรงดึงเมื่อเทียบกับเครื่อง Universal testing machine เท่ากับ 6.19% และค่า $NRMSE$ ของการตรวจวัดค่าความทนแรงกระแทกเมื่อเทียบกับเครื่อง Pendulum impact tester เท่ากับ 16.35% ซึ่งค่า $NRMSE$ ของเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นมีค่ามากกว่าการใช้สเปกโตรมิเตอร์เพียงเล็กน้อย จึงถือได้ว่ามีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับการใช้สเปกโตรมิเตอร์ นอกจากนี้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นยังมีต้นทุนต่ำ, ขนาดเล็ก, ใช้พลังงานน้อย และ

บำรุงรักษาได้ง่ายกว่าเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่สะดวกรวดเร็ว สามารถตรวจวัดได้ทันทีและไม่สร้างความเสียหายกับชิ้นงาน ซึ่งต่างจากการทดสอบสมบัติทางกลโดยทั่วไป

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการส่งผ่านแสงและอัตราส่วนผสมรีไซเคิลมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาการใช้เลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นทดสอบสมบัติทางกลหรือคุณสมบัติอย่างอื่นเช่น ค่าการยืดตัว (Elongation) และค่าความหนาแน่น (Density) เป็นต้น อย่างไรก็ตามเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นยังคงต้องอาศัยการทดสอบสมบัติทางกลเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลและค่าการส่งผ่านแสงในขั้นตอนแรก ดังนั้นการใช้งานเซนเซอร์จึงเหมาะับผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีการเปลี่ยนชนิดของพลาสติกและมีการผลิตที่ละจำนวนมากเช่นในโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องการความสะดวกรวดเร็วในการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ หรือตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการผลิตโดยไม่สร้างความเสียหายกับผลิตภัณฑ์

เนื่องจากสีของตัวอย่างส่งผลโดยตรงต่อค่าการส่งผ่านแสงทำให้ในการตรวจวัดยังคงต้องระบุสีของตัวอย่างก่อนการทดสอบ ดังนั้นอาจมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถพัฒนาเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นร่วมกับการใช้งานเซนเซอร์ตรวจวัดสีเพื่อลดตัวแปรและขั้นตอนที่เกิดจากสีของตัวอย่างได้

งานวิจัยนี้ได้จำกัดชนิดของพลาสติกรวมทั้งความหนาและสีของตัวอย่างที่ใช้ โดยเลือกพิจารณาเฉพาะพลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีนเท่านั้น ซึ่งอาจมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้เซนเซอร์ที่สร้างขึ้นตรวจวัดคุณลักษณะของพลาสติกชนิดอื่น ดังนั้นขอบเขตของการวิจัยจึงสามารถขยายให้กว้างขึ้นได้เช่น เพิ่มชนิดของพลาสติกที่ใช้การทดสอบ, ทดสอบชิ้นงานที่มีความหนาต่างกัน, เพิ่มจำนวนสีที่ใช้ทดสอบนอกเหนือจากแม่สีที่ใช้ รวมทั้งเพิ่มความละเอียดของอัตราส่วนผสมรีไซเคิลให้มากขึ้น เพื่อศึกษาข้อจำกัดและขีดความสามารถในการใช้งานเลเซอร์ไดโอดเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- จินตมัย สุวรรณประทีป. 2547. การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก. บริษัท ดวงกลมสมชัย จำกัด, กรุงเทพฯ.
- คุณิต เครื่องงาม. 2542. สิ่งประดิษฐ์อุปโภคอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่ม 2. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิตา ตั้งคณานุรักษ์. 2547. สเปกโทรสโคปีด้านการวิเคราะห์. ศูนย์หนังสือมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- วิชัย ธีวระกุล, โกศลย์ กุศลาราม, พิเศษฐ์ วิริยะจิตรรา, สุรัชย์ นิมจิรวัดน์ และ อภิชาติ สุขสำราญ. 2526. การประยุกต์สเปกโทรสโคปีในเคมีอินทรีย์. สำนักพิมพ์ห้องเรียน, กรุงเทพฯ.
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2547. เราสามารถนำพลาสติกมา "รีไซเคิล" ได้อย่างไร และพลาสติกชนิดไหนที่รีไซเคิลได้. ถามตอบคำถามด้านวัสดุที่น่าสนใจ. อ้างถึง ธนาวดี ลีจากภัย. รีไซเคิลพลาสติก. แหล่งที่มา: http://emerald.mtec.or.th/th/news/q_a/qa41.html, 28 มีนาคม 2551.
- แหล่งรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับอุตสาหกรรมพลาสติกของไทยและของสากล. 2551. ขนาดและการขยายตัวของอุตสาหกรรมพลาสติกของประเทศคู่ค้าและคู่แข่งที่สำคัญ. อุตสาหกรรมพลาสติกของสากล อ้างถึง สถาบันปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย. แหล่งที่มา: <http://plastic.oie.go.th/sizingplasticindustry.aspx>, 3 กุมภาพันธ์ 2552.
- Inada, K., R. Matsuda, C. Fujiwara, M. Nomura, T. Tamon, I. Nishihara, T. Takao and T. Fujita. 2001. Identification of plastics by infrared absorption using InGaAsP laser diode. **Resource Conservation & Recycling**. 33: 131-146.

Kawaguchi, Y., Y. Sumida, Y. Fukushima and H. Kosaka. 2005. Closed material recycling for plastics from waste appliances, pp. 133-138. **Fourth International Symposium of Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing**. Eco Design 2005.

Wilson, J. and J. Hawkes. 1998. **Optoelectronics : An introduction**. 3rd ed. Prentice Hall, Hertfordshire.

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายโกสินทร์ วะศิริ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	11 มีนาคม 2525
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดระยอง
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (ไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยบูรพา
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-